

UNIVERSIDADE DE LISBOA
INSTITUTO DE GEOGRAFIA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO



POTENCIAL SOLAR EM ESPAÇO LIVRE URBANO

Catarina Margarida de Jesus Marcelino Rodrigo

Orientador: Professor Doutor Jorge Rocha

Co-orientador: Professor Doutor Killian Lobato

Dissertação de
Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial
Aplicados ao Ordenamento

2016

À minha mãe por todos os seus sacrifícios.

Agradecimentos

No decurso desta jornada académica que intercalou estados de motivação e certeza com inúmeros de incerteza e desmotivação ao longo de “caminho” tantas vezes solitário no qual só foi possível terminar graças ao contributo, estímulo e apoio de diversas pessoas, demonstrando que não é possível alcançar todos os objectivos se não trabalharmos com quem nos rodeia, a todas essas pessoas em geral o meu agradecimento. Obrigada!

Existindo, no entanto, pessoas que merecem o meu agradecimento especial por todo o apoio, motivação, partilha de conhecimentos, atenção e disponibilidade.

Assim, o meu especial agradecimento ao meu orientador Professor Doutor Jorge Rocha que ao longo deste percurso (já um tanto comprido) nunca deixou de me motivar apoiar e responder as minhas infindáveis dúvidas e hesitações, por todas as pacientes horas que dedicou do seu tempo e pela forma simples e acessível com que sempre comunicou comigo o meu mais profundo agradecimento, porque sem a sua dedicação e persistência eu não teria conseguido, por todas estas coisas e por tantas outras, MUITO OBRIGADA.

Ao meu co-orientador Professor Doutor Killian Lobato por todas as sugestões na orientação da dissertação.

Aos meus amigos que sem excepção sempre foram pacientes e incansáveis, em especial aqueles que começaram como colegas, mas terminaram como amigos, à Rita Rosa, à Daniela Silva, à Soraia Polido e em especial à Cláudia Viana que dedicou muito do seu tempo na revisão desta dissertação e foi uma constante fonte de motivação e com quem iniciei esta etapa e que seguramente também iniciarem a próxima, obrigada por todo o apoio e incentivo.

Por último, agradeço aos meus pais, irmãos e sobrinhos por todo o carinho, incentivo e tolerância com que lidaram comigo nos últimos meses e a eles deixo o meu agradecimento por sempre acreditarem em mim e por me ajudarem a concluir mais esta etapa.

Resumo

A energia tem um papel central no nosso quotidiano, seja a nível micro (*e.g.* pessoal) ou a nível macro (*e.g.* economia dos países). Nas últimas décadas, devido à contínua e intensiva expansão urbana tem-se assistido a um aumento do consumo de energia. Este aumento origina impactos negativos sobre o ambiente, levando a uma procura por soluções energéticas alternativas que visem o equilíbrio entre a viabilidade económica e o abastecimento energético, sobretudo nessas mesmas áreas urbanas. A energia solar surge como uma resposta proveitosa que coaduna diferentes interesses. No entanto, para que seja possível promover o uso da energia solar em ambiente urbano e implementar os sistemas solares é necessário, em primeiro lugar, conhecer as características e a distribuição geográfica das melhores localizações. Neste contexto, o objectivo desta dissertação foi criar um modelo solar que permita caracterizar, estimar e quantificar o potencial solar do espaço intra-urbano, *i.e.*, áreas de espaço livre. Como tal, recorreu-se ao modelo matemático solar ***Solar Analyst***, um modelo integrado num Sistema de Informação Geográfica (SIG). Através do método ***solar radiation area*** aplicou-se uma metodologia a quatro áreas do município de Lisboa (Alta de Lisboa, Baixa, Madre Deus e Parque das Nações), escolhidas por representarem distintas morfologias urbanas, permitindo desta forma explorar o robusto conjunto de parâmetros integrados neste modelo. Os resultados finais obtidos, referentes ao dia **21 de Dezembro**, resultam da optimização desse conjunto de parâmetros (*e.g.*, a resolução do modelo definida por um ***Sky Size*** de **4000x4000** e as **360 Direcções** de cálculo), e apenas contemplam os valores de radiação directa. Assim, com base na optimização obteve-se o valor mais elevado de radiação solar directa para a área de **Madre Deus** com um total de **608,65 Wh/m²**, seguindo-se a área de **Alta de Lisboa** que apresentou o valor de **616,24 Wh/m²**, a área da **Baixa** obteve **610,37 Wh/m²** e, por fim, o **Parque das Nações** foi a área que apresentou valores mais baixos de radiação solar directa com **603,31 Wh/m²**.

Palavras-chave: Espaço Urbano, Radiação Directa, Calibração do Modelo, Potencial Solar.

Abstract

Energy has an essential role in our daily lives, on a micro (*e.g.* personal) or macro (*e.g.* economy countries) level. The last decades has been associated with the increase in the power consumption largely due to the continuous and intensive urban growth.

The increase of power consumption gives rise to negative impacts on the environment, leading to a search for alternative energy solutions aimed to achieve a balance between economic viability and energy supply especially in those urban areas. Solar energy arises as the answer. In order to insure the implementation of solar energy in urban environment it is necessary to know the characteristics and the geographical distribution of the more suitable locations for solar systems integration. In this context, the aim of this dissertation is to create a solar model that characterize, quantify and estimate the solar potential of intra-urban space.

The integration of solar models in Geographic Information Systems (GIS) is a powerful tool in the solar modeling theme. **Solar Analyst** was the mathematical model option and the **Solar Radiation Area** the method applied. This methodology was implemented in four areas of Lisbon (Alta de Lisboa, Baixa, Madre Deus and Parque das Nações), selected for their different urban morphologies.

The outputs result from an optimization of the models sets parameters (*e.g.* resolution sky model, defined by **4000x4000 Sky Size**, and **360° directions**) applied to **21st December** only direct solar radiation values are include. Based on the optimized set of parameters, for each area we have obtained different direct solar radiation maximum values. The highest value was for the **Alta de Lisboa** with **616.24 Wh / m²**, second was **Madre Deus** with **608.65 Wh / m²**, third was **Baixa** with **610.37 Wh / m²** and the lowest value was for **Parque das Nações** with **603.31 Wh / m²**.

KEYWORDS: Urban Space, Direct Beam Radiation, Model Calibration, Solar Potential.

Índice Geral

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 - OBJECTIVOS.....	3
1.3 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
CAPÍTULO 2 - O TERRITÓRIO E A RADIAÇÃO SOLAR	5
2.1 - AS POTENCIALIDADES DE PORTUGAL CONTINENTAL	5
2.2 - RADIAÇÃO SOLAR	8
2.2.1 - <i>Dispersão atmosférica</i>	10
2.2.2 - <i>Absorção</i>	13
2.2.3 - <i>Transmissividade da atmosfera</i>	15
2.2.4 - <i>Radiação Directa e Indirecta</i>	17
2.2.5 - <i>Variação da radiação solar</i>	19
CAPÍTULO 3 - MODELOS SOLARES	25
3.1 - MODELOS SOLARES PRÉ-SIG E DE 1ª GERAÇÃO.....	27
3.2 - MODELOS SOLARES SIG.....	31
3.3 - MODELOS SOLARES WEB, HÍBRIDOS E NOVA GERAÇÃO	36
CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	39
4.1 - MODELO SOLAR.....	39
4.2 - ÁREAS DE ESTUDO	47
4.2.1 - <i>Alta de Lisboa</i>	50
4.2.2 - <i>Parque das Nações</i>	53
4.2.3 - <i>Bairro Madre Deus</i>	55
4.2.4 - <i>Baixa de Lisboa</i>	58
4.3 - CALIBRAÇÃO DO MODELO	61
4.3.1 - <i>Modelo Digital de Elevação</i>	64
4.3.2 - <i>Latitude</i>	69
4.3.3 - <i>Resolução do Modelo</i>	70
4.3.3.1 - <i>Resolução do céu</i>	70

4.3.3.2 - Direcções de Cálculo	72
4.3.4 - <i>Complexidade do Algoritmo</i>	74
4.3.5 - <i>Configuração Temporal</i>	78
4.3.5.1 - Dia a modelar	79
4.3.5.2 - Hora inicial e final da modelação	84
4.3.5.3 - Intervalo de tempo	84
4.3.6 - <i>Declives e Exposições</i>	87
4.3.7 - <i>Condições Atmosféricas</i>	88
4.3.7.1 - Transmissividade e proporção difusa	89
4.3.7.2 - Modelo de Difusão	91
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DE RESULTADOS	93
5.1 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO	93
5.2 - AJUSTAMENTO DOS RESULTADOS	97
5.3 - DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DIRECTA PELA SUPERFÍCIE	99
5.3.1 - <i>Declives</i>	99
5.3.2 - <i>Exposições</i>	100
5.4 - VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO A DIFERENTES ALTURAS DO SOLO	102
5.5 - SOMBREAMENTO	110
CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	123

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 - DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO GLOBAL MÉDIA ANUAL NA EUROPA (IMAPS GEOMODEL SOLAR, 2015)	5
FIGURA 2.2 - DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DA DIFUSÃO DE MIE.....	12
FIGURA 2.3 – JANELAS ATMOSFÉRICAS E PRINCIPAIS ZONAS DE ABSORÇÃO	14
FIGURA 2.4 - PERCURSOS DA RADIAÇÃO SOLAR A) RADIAÇÃO DIRECTA B) RADIAÇÃO DIFUSA (SEN, 2008)	18
FIGURA 2.5 - RADIAÇÃO GLOBAL (AHRENS, 2009)	19
FIGURA 2.6 - ORBITA TERRESTRE EM TORNO DO SOL.....	22
FIGURA 2.7 - DISTRIBUIÇÃO SAZONAL DA RADIAÇÃO GLOBAL EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	24
FIGURA 4.1 - COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR: A) VIEWSHED; B) SUNMAP ; C) SKYMAP (FU & RICH ,1999).....	40
FIGURA 4.2 - RESULTADO DA PARAMETRIZAÇÃO SOLAR: A) SOBREPOSIÇÃO DO VIEWSHED COM SUNMAP (RADIAÇÃO DIRECTA); B) SOBREPOSIÇÃO DO VIEWSHED COM O SKYMAP (RADIAÇÃO DIFUSA) (FU & RICH , 1999)	40
FIGURA 4.3 - DELIMITAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	49
FIGURA 4.4 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA URBANA DA ALTA DE LISBOA: A) REDE VIÁRIA; B) ORIENTAÇÃO DAS VIAS; E C) DENSIDADE DE VIAS.....	52
FIGURA 4.5 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA URBANA DO PARQUE DAS NAÇÕES: A) REDE VIÁRIA; B) ORIENTAÇÃO DAS VIAS; E C) DENSIDADE DE VIAS	54
FIGURA 4.6 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA URBANA DO BAIRRO MADRE DEUS: A) REDE VIÁRIA; B) ORIENTAÇÃO DAS VIAS; E C) DENSIDADE DE VIAS	57
FIGURA 4.7 - CARACTERÍSTICAS DA MALHA URBANA DA BAIXA DE LISBOA: A) REDE VIÁRIA; B) ORIENTAÇÃO DAS VIAS; E C) DENSIDADE DE VIAS.....	60
FIGURA 4.8 - MDT (EM CIMA) <i>VERSUS</i> MDS (EM BAIXO).....	66
FIGURA 4.9 - WORLD TRADE CENTER (NASA)	67
FIGURA 4.10 - FLUXO DE PROCEDIMENTOS PARA ELABORAÇÃO DO MDS: A) BASE TOPOGRÁFICA VECTORIAL; B) DADOS MATRICIAIS LIDAR; C) BASE PLANIMÉTRICA (EDIFICADO) VECTORIAL; D) MDT; E) MDA; F) MDS	68
FIGURA 4.11 - VARIAÇÃO GEOGRÁFICA DA INTENSIDADE DA LUZ SOLAR COM A LATITUDE.....	69
FIGURA 4.12 - RELAÇÃO ENTE O TEMPO DE PROCESSAMENTO E A RESOLUÇÃO DO SKY SIZE	71
FIGURA 4.13 - RESULTADOS DAS DIFERENTES RESOLUÇÕES TESTADAS APLICADAS À ÁREA TESTE: A) MODELO DE 16 DIRECÇÕES; B) 32; C) 256 E D) 360 DIRECÇÕES	73
FIGURA 4.14 - COMPARAÇÃO PAR A PAR DOS MODELOS COM DIFERENTES DIRECÇÕES.....	74
FIGURA 4.15 - RITMO DE CRESCIMENTO DAS FUNÇÕES (ROCHA, 2014)	77
FIGURA 4.16 - RELAÇÃO ENTE O TEMPO DE PROCESSAMENTO E OS PARÂMETROS DE DIRECÇÃO E A DIMENSÃO DO CÉU	78
FIGURA 4.17 - DIAGRAMA SOLAR (<i>SUNMAP</i>) PARA A ALTA DE LISBOA GERADO A PARTIR DO <i>SOLAR RADIATION GRAPHICS</i>	80
FIGURA 4.18 - ANALEMA REPRESENTATIVO DAS DECLINAÇÕES SOLARES DIÁRIAS.....	81
FIGURA 4.19 - CARTA SOLAR CILÍNDRICA DE LISBOA.....	82
FIGURA 4.20 - ESQUEMA DE ALTURAS SOLARES DE MÁXIMAS (ÀS 12H SOLARES) DE VERÃO E INVERNO PARA A ALTA DE LISBOA	83
FIGURA 4.21 - CARTA SOLAR CILÍNDRICA DE LISBOA JUNTAMENTE COM O ANALEMA REPRESENTATIVO DAS DECLINAÇÕES SOLARES DIÁRIAS	84

FIGURA 4.22 - VARIAÇÃO DIÁRIA DA RADIAÇÃO (INTERVALOS DE 30 MINUTOS) NA ALTA DE LISBOA	86
FIGURA 4.23 - MODELO DE RADIAÇÃO: A) <i>FROM DEM</i> ; B) <i>FLAT SURFACE</i>	88
FIGURA 4.24 - IRRADIAÇÃO SOLAR MÉDIA DIÁRIA PARA LISBOA (SOLTERM)	90
FIGURA 4.25 - VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO DIRECTA E DIFUSA DURANTE O DIA EM LISBOA (GREENPRO,2004)	90
FIGURA 5.1 - RADIAÇÃO DIRECTA TOTAL DIÁRIA NAS 4 ÁREAS DE ESTUDO PARA O DIA 21 DE DEZEMBRO	94
FIGURA 5.2 - VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DIRECTA PARA OS DIA 21 DE JUNHO E 21 DE DEZEMBRO PARA A MADRE DEUS.....	96
FIGURA 5.3 - RADIAÇÃO DIRECTA TOTAL DIÁRIA “CORRIGIDA” NAS 4 ÁREAS DE ESTUDO PARA O DIA 21 DE DEZEMBRO	98
FIGURA 5.4 - DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO DIRECTA EM FUNÇÃO DO DECLIVE	100
FIGURA 5.5 - DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO DIRECTA EM FUNÇÃO DAS EXPOSIÇÕES	101
FIGURA 5.6 - ÁREA (CÉU) NÃO OBSTRUÍDA NAS 4 ÁREAS DE ESTUDO. <i>SOLAR GRAPHICS</i> DO <i>SOLAR ANALYST</i>	102
FIGURA 5.7 - VARIAÇÃO ESQUEMÁTICA DO NÍVEL DO SOLO (ADAPTADO DE HIGUERAS, 2006)	103
FIGURA 5.8 - VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO A DIFERENTES NÍVEIS DO SOLO	105
FIGURA 5.9 - ORIENTAÇÃO DAS RUAS	106
FIGURA 5.10 - PERFIL TRANSVERSAL DIRECÇÃO E-O DA BAIXA DE LISBOA	107
FIGURA 5.11 - SOMBREAMENTO DA ÁREA DA BAIXA DE LISBOA (DA ESQUERDA PARA A DIREITA E DECIMA PARA BAIXO: DAS 8H ATÉ ÀS 17H, COM INTERVALOS DE 30 MINUTOS)	108
FIGURA 5.12 - SOMBREAMENTO DE UM EDIFÍCIO PADRÃO DA BAIXA DE LISBOA (DA ESQUERDA PARA A DIREITA E DECIMA PARA BAIXO: DAS 8H ATÉ ÀS 17H, COM INTERVALOS DE 60 MINUTOS).....	109
FIGURA 5.13 - PROBABILIDADE SEGUNDO A ORIENTAÇÃO DA FUNÇÃO SIGMOIDAL: A) CRESCENTE E B) DECRESCENTE.....	111
FIGURA 5.14 - SOMBREAMENTO A 0 METROS	113
FIGURA 5.15 - PERCENTAGEM DE ÁREA SOMBREADA A DIFERENTES SOBREELEVAÇÕES DO SOLO (PASSOS DE 1 METRO)	115
FIGURA 5.16 - PERCENTAGEM DE ÁREA SOMBREADA A DIFERENTES HORAS DO DIA E A DIFERENTES NÍVEIS DO SOLO	117

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 – COMPOSIÇÃO DA ATMOSFERA AO NÍVEL DO MAR	9
TABELA 3.1 - MODELOS SOLARES.....	26
TABELA 4.1 - PARÂMETROS UTILIZADOS PELO <i>SOLAR ANALYST</i> NA MODELAÇÃO SOLAR	45
TABELA 4.2 - PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O MODELO DE RADIAÇÃO SOLAR EM ÁREA	63
TABELA 4.3 - INFORMAÇÃO BASE E INFORMAÇÃO DERIVADA	66
TABELA 4.4 - DADOS DE LATITUDE	70
TABELA 4.5 - RESULTADOS DO TEMPO DE PROCESSAMENTO PARA ÀS DIFERENTES DIRECÇÕES DE CÁLCULO.....	72
TABELA 4.6 - ORDENS DE COMPLEXIDADE ALGORÍTMICA (ROCHA, 2014).....	76
TABELA 5.1 - VARIAÇÃO HORÁRIA DA RADIAÇÃO SOLAR DIRECTA (WH/M^2) NAS 4 ÁREAS DE ESTUDO	95
TABELA 5.2 - COMPRIMENTO DAS SOMBRAS A DIFERENTES HORAS DO DIA PARA DOIS EDIFÍCIOS TIPO (15 E 5 METROS DE ALTURA)	110
TABELA 5.3 - CLASSES DE SOMBREAMENTO.....	112

Índice de Palavras-chave

absorção	10, 13	meridiano zero celeste	21
afélio	20	modelo de difusão	88
Algoritmo de Dozier	28	modelo de Kumar	29
ALS	65	movimento de rotação	20
Alta de Lisboa	93, 97, 101, 102, 120	movimento de translação	20
análise experimental	75	núcleo antigo	50
análise formal	75	obliquidade da eclíptica	21
ATM	27, 29, 31	Onyx Solar	38
Baixa	120	operação básica	75
Baixa de Lisboa	93, 97, 101, 102	Parque das Nações	93, 97, 100, 102, 120
CLOUDY	28, 29, 31	periélio	20
coeficiente de absorção	13	ponto Vernal	21
coeficiente de dispersão	12	pontos equinociais	21
coluro equinocial	21	primeiro ponto de Áries	21
condições normais de céu limpo	89	profundidade óptica	13
difusão de Mie	11	Programa de Kumar	31
difusão de <i>Rayleigh</i>	11	proporção difusa	88
dimensão de entrada	75	PVGIS	36
dispersão	10	<i>r.horizon</i>	33
dispersão não selectiva	11	<i>R.sun</i>	32, 33, 36
dispersão selectiva	11	<i>r.sunyear</i>	33
divisões do Zénite	91	Radiação Difusa	17
Easy Solar	38	Radiação Directa	17
eclíptica	21	radiação global	17, 18
eficiência espacial	74	radiação solar difusa	39
eficiência temporal	74	radiação solar directa	39
equinócio vernal	21	<i>Skymap</i>	39
espessura óptica	13	<i>Solar Analyst</i>	31, 39
<i>FLAT SURFACE</i>	87	<i>Solar Radiation</i>	39
<i>FORest GAP</i>	34	Solar Shading	38
<i>FROM DEM</i>	87	SOLARFLUX	28, 31
função sigmoideal	111	SolarGIS	37
<i>GENASYS</i>	29	SOLEI	31
Helios	35	SOLEI-32	30
ICUE	34	SRAD	28, 29, 31
índice de refração	16	<i>Standart overcast Sky</i>	41
inexistência de transmissão	89	<i>Sunmap</i>	39
lei de <i>Beer</i>	13	Sunny Portal	38
lei de Bourguer	13	TIN	64
lei de Lambert-Beer	13	Toporad	34
lei de Snell	17	trânsito inferior	21
LiDAR	65	trânsito superior	21
linha dos equinócios	21	transmissão total	89
lógica difusa	111	transmissividade	88
Madre Deus	93, 95, 97, 100, 102, 120	transmissividade da atmosfera	15
Malhas ortogonais	50	<i>Uniform Sky</i>	41
malhas relativamente irregulares	50	<i>Viewshed</i>	39

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Enquadramento

A Energia tem um papel central na nossa vida, desde as actividades do quotidiano até ao crescimento das economias dos países. Os crescentes impactos negativos sobre o ambiente originados pelo consumo energético verificado nas últimas décadas têm levado a uma busca de estratégias/soluções de desenvolvimento sustentável que visem não só o equilíbrio entre o abastecimento energético e a viabilidade económica, mas também a segurança do abastecimento e a sua competitividade.

A contínua expansão urbana, com 80 % da população europeia a viver em cidades, torna as cidades um foco de desenvolvimento, promovendo a concentração de pessoas, bens, serviços e actividades, levando a um consequente aumento da utilização de energia nestas áreas (75 % da procura total de energia). Este aumento aliado aos problemas energéticos decorrentes da utilização e dependência das energias convencionais (carvão, petróleo e gás) determina a necessidade na procura de novas soluções energéticas eficientes sobretudo em áreas urbanas (POLIS, 2010).

O empenho na investigação de alternativas viáveis juntamente com a evolução nas tecnologias de aproveitamento de energia “convertem” as energias renováveis em alternativas de futuro, sendo gradualmente mais solicitadas e tornando-se cada vez mais uma parte importante do “mix” global de energia.

Do leque de tecnologias de energias renováveis disponíveis, a energia solar, talvez pelo seu menor impacto negativo sobre o ambiente e a facilidade no qual pode ser convertida em “energia utilizável” através por exemplo do uso de sistemas fotovoltaicos (que têm a capacidade de se fundirem dentro do ambiente urbano sem transformar as cidades em enormes fabricas de produção de energia), torna a energia solar a melhor das energias renováveis (Solangi *et al.*, 2011).

As energias renováveis permitem-nos tirar partido das fontes de energia a um nível local. No entanto, para que a integração no mercado das energias renováveis seja

bem-sucedida, a compreensão do potencial de implementação em diferentes áreas geográficas e a sua viabilidade económica é essencial. Como tal, nas últimas duas décadas têm vindo a ser desenvolvidos diversos modelos solares (Hetrick *et al.*, 1993) que integrados nos sistemas de informação geográfica (SIG), permitem estimar o valor da radiação solar revelando o seu potencial, registando-os sob a forma de mapas/cartas solares, e tornando-os em valiosas ferramentas analíticas que permitem quantificar as capacidades locais para a produção de energia (fotovoltaica e térmica). A avaliação do potencial existente contido no “mapeamento” solar permite, através do planeamento urbano e sempre em consonância com as políticas e os objectivos de desenvolvimento sustentável, implementar nas cidades novas estratégias de aproveitamento energético, como por exemplo os sistemas solares fotovoltaicos descentralizados, sejam inseridos no edificado (telhados ou fachadas) ou nos espaços livres envolventes.

Para aceder a este potencial é necessário, inicialmente, a operacionalização da aptidão solar das estruturas urbanas existentes sendo que para as estruturas urbanas futuras alcançarem o seu potencial máximo é necessário definir e fomentar desde a fase inicial da concepção urbana, a integração das tecnologias solares em conjunto com um desenho urbano que leve a um equilíbrio entre forma e função. Isto porque a energia solar mais do que qualquer outra energia solar está ligada às interações entre a forma, função e disposição dos edifícios (POLIS, 2010).

Assim, o conhecimento do potencial de superfícies disponíveis para a instalação de tecnologias de electricidade e calor está centrado sobretudo no ambiente construído (edificado). É neste sentido que esta dissertação acrescenta inovação. Este trabalho consiste na optimização de um modelo de irradiação solar¹ que permita quantificar a radiação solar directa para quatro áreas do município de Lisboa, Alta de Lisboa, Baixa, Madre Deus e Parque das Nações.

Estas quatro áreas teste prefiguram diferentes morfologias urbanas, susceptíveis de influenciar de forma diferenciada a radiação incidente sobre a superfície. É dada especial importância aos espaços públicos existentes (entenda-se livres de edificado), sejam de uso livre ou não, como potenciais espaços de implementação de estruturas de aproveitamento

¹ Quando falamos em irradiação falamos em energia por m² ou seja em energia solar integrada (Wh/m²). Sempre que falamos em energia solar instantânea falamos de potência por m² e em irradiância (W/m²).

de energia solar descentralizadas; considera-se que estes representam um activo importante e ainda por explorar, uma vez que os estudos existentes se centram no potencial solar do topo de edifícios (*e.g.* Santos *et al.*, 2014, Brito *et al.*, 2012 ou o projecto europeu POLIS 2010) ou mesmo das fachadas (*e.g.* Brito, Redweik & Catita, 2013). Pretende-se assim, tendo em vista futuros estudos de radiação solar, estabelecer um modelo solar bem parametrizado, que forneça informação detalhada sobre a disponibilidade dos recursos energéticos em espaços públicos.

1.2 - Objectivos

Na perspectiva de contribuir para os desenvolvimentos feitos na modelação solar e com o intuito de dar continuidade a trabalhos anteriormente realizados pelo Centro Interdisciplinar de Ciências Sociais (CICS.NOVA) da Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa e pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, foi utilizado um modelo solar (*Solar Analyst*) para realizar o “mapeamento” da radiação solar directa. O algoritmo foi aplicado a quatro áreas morfologicamente distintas do município de Lisboa.

Neste contexto, a presente dissertação engloba os seguintes objectivos:

- I. Explorar e encontrar os valores de parametrização mais adequados para a calibração do modelo solar (resolução do céu, direcções, proporção difusa etc.), numa tentativa de colmatar algumas falhas existentes na literatura.
- II. Depois de encontrados os valores de calibração correctos, analisar e validar a cartografia temática gerada.
- III. Produzir nova cartografia temática a diferentes alturas do solo com o intuito de estudar a variação da radiação solar directa a diferentes níveis.
- IV. Identificar e classificar a percentagem de sombreamento existente e identificar os espaços livres de maior potencial.

1.3 - Organização da dissertação

A presente dissertação é estruturada em seis capítulos. No primeiro é feito um breve enquadramento da temática em estudo, sendo apresentados os objectivos e forma de organização da dissertação. No segundo capítulo é realizada uma contextualização de Portugal Continental face às energias renováveis em especial a energia solar. Também é introduzida a temática da radiação solar, suas características e distribuição.

O terceiro capítulo procura fazer uma revisão da literatura existente sobre modelos solares. Não se pretende, no entanto, fazer uma descrição exaustiva de todos os modelos descritos, mas sim focar aqueles que tanto a nível académico ou empresarial se têm destacado no estudo desta temática. Ao longo deste ponto tenta-se estabelecer uma linha cronológica dos diversos modelos, descrevendo de uma forma breve as suas características, objectivos de desenvolvimento, evolução, trabalhos desenvolvidos no contexto da sua aplicação e sempre que possível destacando as suas vantagens e desvantagens.

O quarto capítulo é referente à modelação. É onde se fundamenta a escolha do modelo solar (*Solar Analyst*) e onde é explicitada toda a componente algébrica do algoritmo usado na modelação, uma vez que a sua compreensão é fundamental para a análise e interpretação dos resultados. Neste capítulo, é também realizada a calibração do modelo, ao mesmo tempo que todos os seis conjuntos de parâmetros são detalhadamente descritos e os valores cuidadosamente explicados. Por último, é feito um enquadramento das quatro áreas de estudo que são elas Madre Deus, Alta de Lisboa, Baixa de Lisboa e Parque das Nações, explicando o porquê desta escolha.

O quinto capítulo consiste na análise de resultados. Aqui procede-se a uma primeira análise dos resultados obtidos directamente da calibração e posteriormente efectua-se a correcção/ajustamento dos resultados, estabelecendo sempre uma comparação entre as diferentes áreas em estudo.

Por ultimo, o sexto capítulo, é o capítulo referente às considerações finais e tem por objectivo sintetizar os aspectos mais importantes dos capítulos quatro e cinco, e ainda deixar algumas sugestões para futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2 - O Território e a Radiação Solar

2.1 - As potencialidades de Portugal Continental

No que diz respeito às potencialidades geográficas e políticas energéticas, a realidade nacional é distinta da grande maioria dos países da união europeia. Portugal Continental (doravante referido apenas como Portugal), devido à sua localização geográfica pode beneficiar sobremaneira do aproveitamento da radiação (energia) solar, pois é dos países da Europa que apresenta valores mais elevados de radiação solar por unidade de superfície.

Segundo Ramos e Ventura (1998), no território nacional a radiação solar total média anual é de $1,74\text{MWh/m}^2/\text{ano}$, valor bastante superior à média Europeia, com $1,16\text{MWh/m}^2/\text{ano}$, e apenas superado pelos valores registados nas regiões tropicais áridas e semiáridas ($2,32\text{MWh/m}^2/\text{ano}$). Também Vallêra (2006) confirma que Portugal não é só o país da Europa continental com maior radiação média mas também tem, em média, mais luz solar do que a Espanha, a Itália ou a Grécia. Estes resultados estão ilustrados na Figura 2.1 que representa a radiação global anual horizontal para toda a Europa.

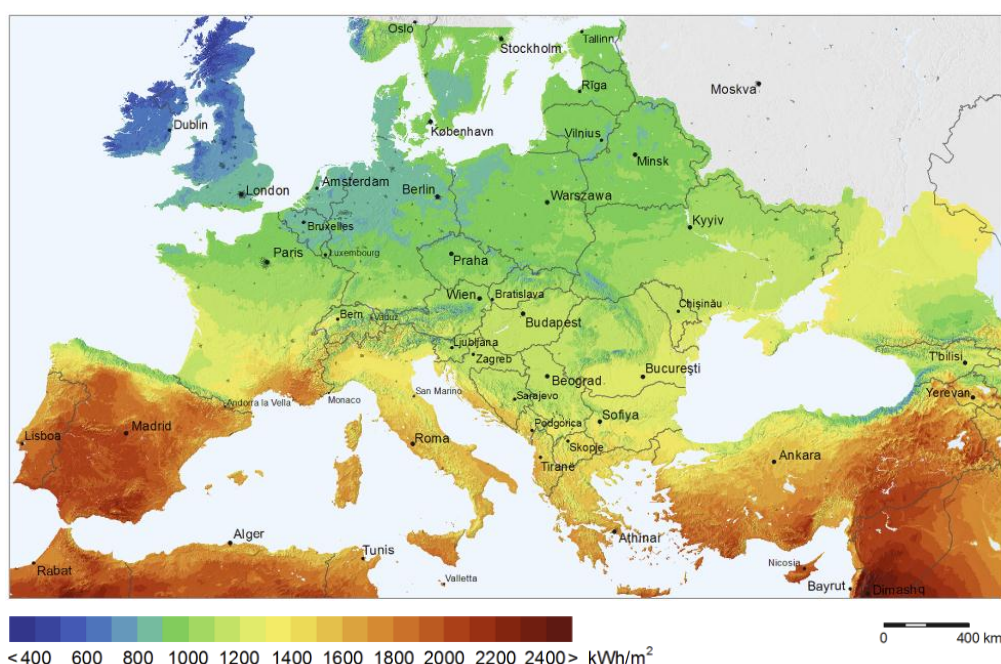


Figura 2.1 - Distribuição da radiação global média anual na Europa (iMaps GeoModel Solar, 2015)

Ao analisar a dependência energética de todos os Estados Membros apenas a Dinamarca apresenta uma dependência energética negativa, devido à forte aposta na utilização de energias renováveis. O governo dinamarquês afectado gravemente pelas flutuações do preço do petróleo no início dos anos 1970 e com poucas alternativas (uma vez que na Europa em 2005 existia 1,3% das reservas mundiais), optou por traçar um plano, dando especial importância à utilização de Energias Renováveis; de tal ordem que para 2050 tem como principal objectivo “alimentar” o país inteiramente a partir de energia renovável, sendo hoje, uma excepção em termos de sustentabilidade energética (Eurostat,2009).

Em 2007 Portugal produziu cerca de 17% da energia que consumiu, sendo actualmente o sexto país da União Europeia mais dependente do exterior (Roriz *et al.*, 2010). No entanto, apesar da grande dependência de fontes de energia externa, face à tomada de consciência de que o desenvolvimento sem qualidade ambiental não é possível, Portugal tem apostado em opções estratégicas não só para a diversificação de fontes de energia, mas sobretudo na maximização das potencialidades energéticas do território.

Apesar de todo um conjunto de vantagens na utilização das “energias renováveis” sendo a principal o facto de serem inesgotáveis e contribuírem para a diminuição da poluição atmosférica e a consequente redução das emissões dos gases com efeito de estufa, estas ainda não estão devidamente implementadas. No que diz respeito pelo menos à energia solar, Portugal encontra-se em vantagem comparativamente aos países do Norte da Europa (por exemplo a Dinamarca): então porque é que continuamos tão dependentes?

A resposta encontra-se nas políticas energéticas. Nesse sentido, Portugal têm feito um esforço notório para minimizar a situação de dependência e várias políticas têm sido delineadas numa tentativa de estruturar uma política energética nacional forte, onde o foco será a utilização crescente das fontes de energia renovável.

Alias, a Resolução de Conselho de Ministros n.º 29/2010 de 15 de Abril² estabelece metas bastante arrojadas como “ (...) assegurar a posição de Portugal entre os cinco líderes

² A Revoga a anterior RCM n.º 169/2005, de 24 de Outubro. A qual define a agenda para a competitividade, para o crescimento e para a independência energética e financeira do país através da aposta nas energias renováveis e da promoção integrada da eficiência energética, assegurando a segurança de abastecimento e a sustentabilidade económica e ambiental do modelo energético preconizado, contribuindo para a redução de emissões de Co2 e gerando benefícios para a sociedade que progressivamente internalizados no preço da energia final permitirão assegurar melhores condições de competitividade para a economia.

europeus ao nível dos objectivos em matéria de energias renováveis em 2020 e afirmar Portugal na liderança global na fileira industrial das energias renováveis, de forte capacidade exportadora (...) ”

A Resolução de Conselho de Ministros n.º 29/2010 de 15 de Abril para além de considerar os objectivos da política energética definida pelo XVIII Governo Constitucional, estabeleceu uma nova Estratégia Nacional de Energia para o horizonte 2020 (ENE 2020), a fim de criar um novo enquadramento global para a aprovação do Plano Nacional para as Energias Renováveis (PNAER) e para a revisão do Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética, cujo alguns dos principais objectivos passam por:

- A redução da dependência energética do País face ao exterior para 74 % em 2020;
- A redução do consumo de energia final em 20% até 2020;
- A promoção do desenvolvimento sustentável, criando condições para o cumprimento das metas de redução de emissões assumidas por Portugal no quadro europeu;

Portugal tem assim o compromisso de em 2020 atingir a meta de 31% de consumo final proveniente de fontes renováveis (PNAER,2009). Neste momento Portugal encontra-se no caminho correcto uma vez que desde de 2007 mais de 40% da electricidade tem origem em fontes de energia renováveis. Apesar de a base de produção estar fundamentalmente assente na combinação da energia hídrica e da energia eólica, a energia solar posiciona-se como a tecnologia com maior potencial de desenvolvimento em Portugal durante a próxima década, devido sobretudo ao“ (...) sucesso associado à introdução da micro-geração³ e o enorme impacto que teve na sociedade e na indústria justifica que se estabeleçam metas mais ambiciosas para este segmento e que se agilize também a introdução de um programa de mini -geração destinado a projectos com potências até 150 kW ou 250 kW em função da tecnologia (...) ” (RCM nº29/2010).

Com esta conjectura auspiciosa é necessário investir cada vez mais no estudo da disponibilidade da energia solar pode melhorar a compreensão e promover do seu potencial, contribuindo assim um pouco mais para o futuro desta energia diluindo algumas das eventuais desvantagens (*e.g.* os elevados custos de investimento inicial aleados por vezes a um período de retorno económico demasiado longo), criando politicas e incentivos mais

³ O Decreto-Lei n.º 25/2013 de 19 de Fevereiro veio alterar o regime jurídico da mini-produção e microprodução estabelecido anteriormente pelo Decreto-Lei n.º 34/2011.

eficazes sendo que o futuro passará cada vez mais pelo aproveitamento articulado das fontes de energias renováveis, havendo que ajustar as escalas e os métodos de exploração.

Desenvolver metodologias que permitam a identificação do potencial solar existente, não só nas fachadas e nos telhados (carta solar de Lisboa) mas em áreas disponíveis de semelhante potencial, torna-se então imperativo. A construção de uma carta do potencial solar pode reduzir a necessidade de avaliações individuais tornando o processo de decisão presumivelmente mais célere.

2.2 - Radiação Solar

O Sol é um enorme reactor onde ocorre a fusão de núcleos de hidrogénio para a formação de hélio gerando, assim, a partir da sua fusão energia que se propaga sob a forma de ondas electromagnéticas a uma velocidade de 3×10^8 m/s. A radiação demora cerca de 8 minutos a atingir a atmosfera terrestre (Peixoto, 1981).

Segundo o Atlas do Ambiente (1988) a radiação solar é a quantidade de energia emitida pelo Sol, que se propaga por meio de ondas electromagnéticas e da qual só uma parte é recebida na superfície da terra.

Especialistas consideram que o Sol tem aproximadamente 5 mil milhões de anos, com um tempo de vida útil de 10 mil milhões de anos apresentando-se como uma fonte de energia virtualmente ilimitada, assim a radiação solar é uma fonte limpa, renovável e abundante de energia (GREENPRO. 2004).

Um dos principais argumentos usados para desvalorizar a energia proveniente da radiação solar é que nunca será suficiente para satisfazer as necessidades humanas (Vallêra, 2006), no entanto se considerarmos uma superfície perpendicular à direcção Sol-Terra, a potência média da radiação solar na superfície exterior da atmosfera terrestre é de 1367 W/m^2 (chamada constante solar), e considerando que o raio médio da Terra é de 6371 km, a potência total da radiação solar é de $7 \times 10^{17} \text{ W}$. Como o consumo total de energia é $1,5 \times 10^{13} \text{ W}$ (Hayward, 2009), a radiação solar é cerca de 46 000 vezes superior às necessidades energéticas do mundo, pelo que podemos dizer que em 11 minutos o planeta recebe do Sol toda a energia que consome durante um ano (Roriz *et al.*, 2010). Vallêra

(2006) afirma mesmo que com a actual tecnologia, 20 m² de painéis fotovoltaicos por pessoa seriam suficientes para satisfazer o consumo *per capita* português actual.

No entanto, apesar do planeta estar constantemente a receber radiação solar, a temperatura do planeta não aumenta, mantem-se estável. Então qual é o destino de toda essa energia?

A verdade é que nem toda a radiação que atinge o topo da atmosfera chega na realidade à superfície terrestre, devido as complexas interacções com a atmosfera. A atmosfera é, ao nível do solo, composta essencialmente por Nitrogénio e Oxigénio, mas existem outros elementos (Tabela 2.1), ao mesmo nível ou já na alta atmosfera, que detêm um papel assaz importante no desenrolar do processo de aquisição de imagens. Estão nesta situação o Vapor de Água e o Dióxido de Carbono e, com o aumento da altitude, o Ozono e o Hélio.

Tabela 2.1 – Composição da atmosfera ao nível do mar

Gás Constituinte	Símbolo	Quantidade (%)
Nitrogénio	N ₂	78,084
Oxigénio	O ₂	20,9476
Árgon	Ar	0,934
Dióxido Carbono	CO ₂	0,0314
Néon	Ne	0,001818
Hélio	He	0,0000524
Krypton	Kr	0,0000114
Xénon	Xe	0,0000087
Hidrogénio	H ₂	0,000005
Metano	CH ₄	0,0002
Óxido Nítrico	N ₂ O	0,00005
Ozono	O ₃	Verão: 0 a 0,000007 Inverno: 0 a 0,000002
Dióxido Sulfúrico	SO ₂	0 a 0,0001
Dióxido Nitrogénio	NO ₂	0 a 0,000002
Amónia	NH ₃	0 ao detectado
Monóxido Carbono	CO	0 ao detectado
Iodo	I ₂	0 a 0,000001

Para além dos gases e da água são ainda parte constituinte da atmosfera os aerossóis. Estes apresentam uma dimensão situada entre os 10⁻⁴ e os 10 µm, e mais não são do que partículas em suspensão, no estado sólido ou líquido, geradas da interacção de gases enviados para a atmosfera através de processos de índole natural (*e.g.* actividade vulcânica, incêndios florestais, etc.), ou artificial (*e.g.* incineração de lixos, combustões automóveis,

etc.), da erosão eólica e da libertação de partículas de sal pelo *white clapping* (“corte” da crista das ondas pelo vento) e pela rebentação das ondas (Fonseca, 1999).

A atmosfera tem, como uma das suas principais características, o papel de “filtro” perante determinados comprimentos de onda (como é o caso dos raios gama, raios X e uma grande parte dos raios ultravioletas). Em virtude da interacção entre a radiação electromagnética e as partículas em suspensão na atmosfera (gases permanentes, partículas sólidas, aerossóis, etc.), ocorrem dois tipos de fenómenos: **dispersão** (*scattering*) e **absorção**, cujos efeitos variam consoante a região do espectro electromagnético. As regiões que lhes são “imunes” são designadas por “janelas atmosféricas”, na medida em que permitem a passagem da radiação electromagnética através da atmosfera sem grandes alterações da sua intensidade.

Assim, da energia que entra na atmosfera, uma parte é difundida e outra absorvida, chegando a restante ao solo. Esta última não provém, na sua totalidade, directamente do Sol (22%), mas também da dispersão e reflexão provocadas pelos constituintes atmosféricos (78%). A Terra reflecte uma parte dessa energia (4%), absorvendo 47% (22% de energia directa e 25% de energia difusa) do total de energia incidente na superfície (Peixoto, 1991). Assim, apenas cerca de 70% da energia correspondente à constante solar atinge a superfície do planeta (Collares Pereira, 1998).

2.2.1 - Dispersão atmosférica

A dispersão (ou difusão) atmosférica resulta da interacção entre a radiação electromagnética e as partículas e/ou moléculas de gás presentes na atmosfera, tais como o vapor de água e aerossóis, provocando a redistribuição da energia em torno das partículas difusoras. O seu efeito está dependente das condições meteorológicas e da altura do Sol, que por sua vez está condicionada pela estação do ano e pela hora do dia.

Embora a dispersão pareça ser um fenómeno similar à absorção é, no entanto, bastante mais complexa. De facto, a radiação dispersa (considerando que não existe absorção posterior) nunca se perde, podendo ser dispersa mais do que uma vez, e até voltar a integrar o feixe de radiação inicial. A probabilidade da radiação ser dispersa mais do que

uma vez está directamente relacionada com a atenuação total que esta sofre, devido à dispersão, ao longo do caminho percorrido.

Existem várias formas de difusão. No entanto, os principais tipos dividem-se entre **dispersão selectiva** e **não selectiva**. A **dispersão selectiva** afecta comprimentos de onda específicos da radiação electromagnética, enquanto a **dispersão não selectiva** é independente destes, ocorrendo em situações em que a dimensão das partículas é de tal ordem que afecta de forma homogénea todos os comprimentos de onda. Posto isto, pode-se definir difusão não selectiva como aquela que é independente do comprimento de onda da radiação, sendo provocada por partículas com um diâmetro muito elevado ($> 10 \mu\text{m}$), de que são exemplo as partículas de gelo presentes nas nuvens. Todos os comprimentos de onda do visível são difundidos por estas partículas, facto que explica a cor branca das nuvens e do nevoeiro.

Por outro lado, a dispersão provocada pelas pequenas partículas está directamente dependente do seu raio (R) e do comprimento de onda, sendo estes dois factores relacionados pela medida (adimensional) q :

$$q = \frac{2\pi R}{\lambda} \quad (2.1)$$

No âmbito da difusão selectiva, deverão ser consideradas:

1. A **difusão de Rayleigh**, que ocorre quando a radiação interage com partículas cujo diâmetro é inferior ao comprimento de onda da radiação. Neste caso, $q \ll 1$, pelo que a dispersão é muito fraca e proporcional a λ^{-4} . Dentro da região do visível, os pequenos comprimentos de onda (azul, violeta) são difundidos em mais larga escala que os mais longos (vermelho). A difusão de *Rayleigh* é a que mais influência exerce, sobretudo na banda azul da região visível, sendo responsável pela cor azul do céu e pela sua tonalidade avermelhada do entardecer.

Esta difusão provoca um efeito designado névoa (*haze*) que, na prática, corresponde a uma diminuição do contraste. Este efeito detecta-se por uma tonalidade cinzento-azulada, a qual é tanto maior quanto maior for a altitude.

2. A **difusão de Mie**, apresenta uma complexidade bastante superior ao caso precedente e constitui uma situação intermédia entre este e a difusão não selectiva,

ocorrendo quando as partículas atmosféricas possuem diâmetros semelhantes aos comprimentos de onda da radiação ($q \approx 1$). A sua complexidade deriva da refração e da interferência causada pela luz dispersa de diferentes partes da superfície da partícula. Esta forma de difusão é anisotrópica (contrariamente à difusão de *Rayleigh*) e a distribuição angular dos fótons difundidos varia principalmente em função da dimensão das partículas e do comprimento de onda (embora não de forma tão acentuada como na difusão de *Rayleigh*). A Figura 2.2 representa-a em três situações distintas, mais propriamente para um comprimento de onda de $0,05 \mu\text{m}$ e para três dimensões de raio (R) das partículas ($0,05 \mu\text{m}$, $0,1 \mu\text{m}$ e $0,5 \mu\text{m}$), verificando-se grandes variações no ângulo de dispersão.

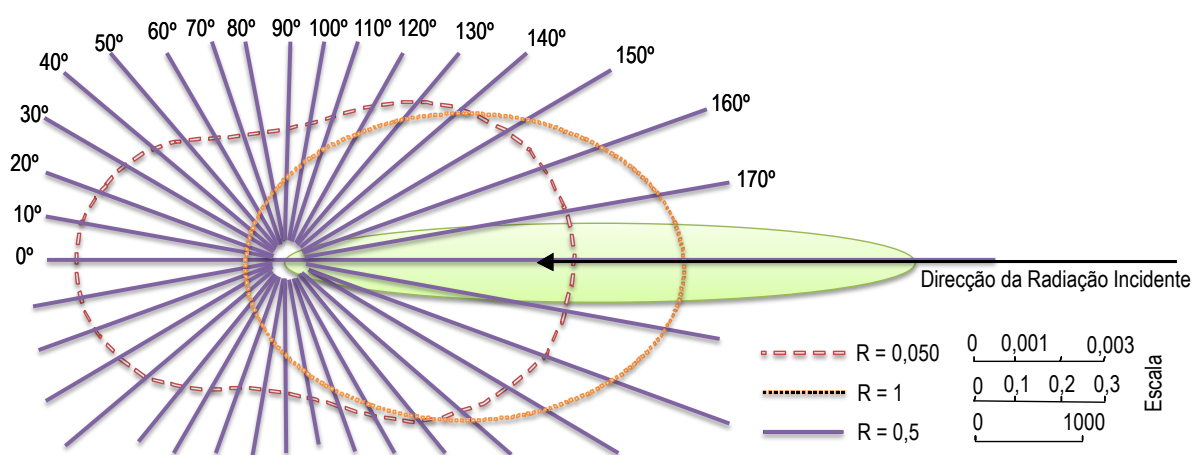


Figura 2.2 - Distribuição Angular da Difusão de Mie

A atenuação da radiação pela dispersão pode ser quantificada através do **coeficiente de dispersão** $\beta(\lambda)$, comprimento recíproco, expresso em m^{-1} , que traduz a fracção da área total das partículas existentes na atmosfera, que remove o fluxo incidente, sendo definido por:

$$\beta(\lambda) = -\frac{1}{I} \frac{dI(\lambda)}{dx} \quad (2.2)$$

com,

$$\frac{dI(\lambda)}{dx} = -\alpha(\lambda, x) I(x) , \quad (2.3)$$

onde $I(x)$ é a intensidade radiante à profundidade x , $\alpha(\lambda, x)$ o coeficiente de absorção do meio e x a distância percorrida pela onda.

O **coeficiente de absorção** é característico do meio e depende do comprimento de onda. Tal como o próprio nome indica, corresponde à intensidade radiante que é absorvida por unidade de comprimento e expressa-se em m^{-1} . A intensidade da radiação ao longo do percurso pode ser calculada integrando (2.3):

$$I(x) = I(0) e^{\left(- \int_0^x \alpha(\lambda, x') dx' \right)}, \quad (2.4)$$

onde I_0 é a intensidade radiante à superfície (incidente). Se o meio for homogéneo (α não depende de x) resulta, de (2.4) que:

$$I(x) = I(0) e^{(-\alpha(\lambda)x)}, \quad (2.5)$$

relação conhecida por **lei de Beer** (ou também **lei de Bourguier** ou **lei de Lambert-Beer**). Neste caso, após percorrida a distância $1/\alpha$, a radiação é atenuada de $1/e$ do seu valor inicial.

O integral do coeficiente de absorção ao longo do percurso x_1, x_2 resulta numa grandeza adimensional - $\tau(x_1, x_2)$ - conhecida como **espessura óptica** ou **profundidade óptica**:

$$\tau(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} \alpha(x') dx' \quad (2.6)$$

2.2.2 - Absorção

A **absorção** contrasta com a dispersão, na medida em que resulta na perda efectiva de energia para os elementos constituintes da atmosfera (a energia radiante é transformada noutro tipo de energia), em função do comprimento de onda da radiação. Existem gases constituintes da atmosfera com grande responsabilidade nesta acção, actuando em zonas específicas do espectro electromagnético, por isso designadas de “zonas de absorção” (Figura 2.3).

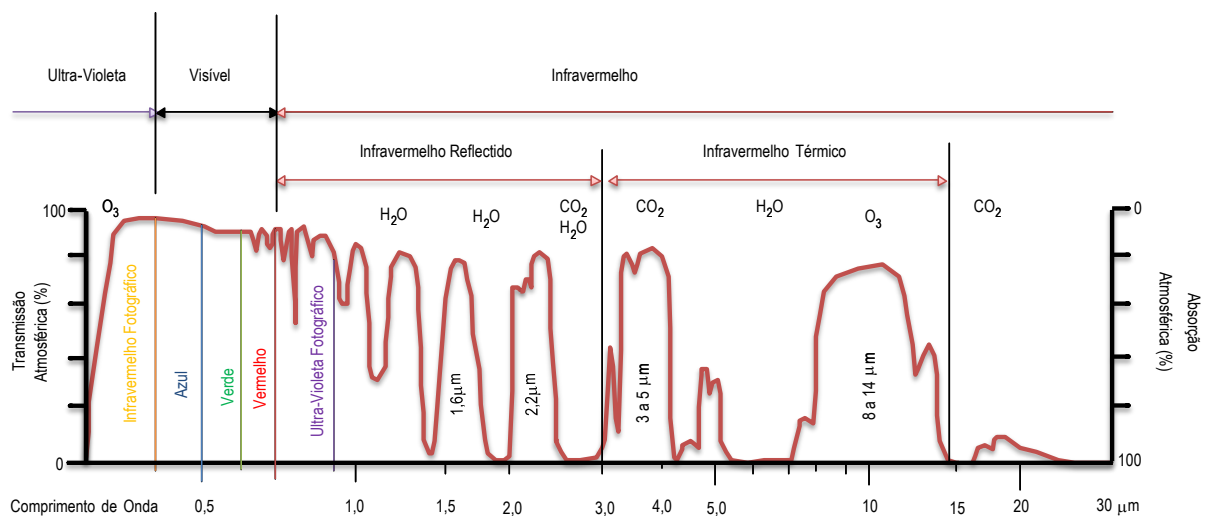


Figura 2.3 – Janelas atmosféricas e principais zonas de absorção

O Dióxido de Carbono, o Ozono e o Vapor de Água são os principais intervenientes no fenómeno da absorção, merecendo pois uma análise mais detalhada: O Dióxido de Carbono absorve energia com comprimentos de onda correspondentes à região do infravermelho próximo, principalmente a dos 4,3 μm e toda a radiação superior a 14 μm (infravermelho térmico). O ozono, impede que os raios ultravioleta (0,3 μm) atinjam o solo. Apesar da sua acção se fazer sentir abaixo dos 0,3 μm , e nas bandas dos 0,5 μm , 9,6 μm e 14 μm , a concentração deste gás junto à superfície é diminuta, traduzindo-se numa absorção insignificante de radiação. Por fim, a quantidade de vapor de água (expressa em g/m^3) – não confundir com a água já condensada que dá origem ao orvalho e ao nevoeiro – varia bastante no tempo e no espaço o que levou à sua exclusão da Tabela 2.1. A sua acção faz-se normalmente notar nos comprimentos de onda 1,4 μm , 2,66 μm , 2,74 μm e 6,25 μm .

Importa ainda referir a absorção levada a efeito pelas partículas, líquidas ou sólidas, em suspensão na atmosfera, cujo diâmetro varia entre 10^{-4} μm e 10 μm são conhecidas como aerossóis. A absorção pelos aerossóis é conhecida como albedo de dispersão singular e corresponde à razão entre a radiação reflectida e incidente no aerossol (varia entre 0 = totalmente absorvente e 1 = totalmente difusor).

Exposta, a interacção entre a radiação electromagnética e a atmosfera, pode-se concluir que só as regiões espectrais onde os efeitos anteriormente descritos se fazem sentir de forma bastante moderada é que permitem a obtenção de imagens da Terra sendo por isso designadas de “janelas atmosféricas” ((Figura 2.3). As principais janelas atmosféricas são o visível, o infravermelho próximo (0,5 μm a 1,4 μm) e o infravermelho térmico (4,4 μm a 5,5 μm e 8 μm a 14 μm). A região entre os 8 μm e os 14 μm é de extrema importância pois corresponde ao máximo de energia emitida pela Terra.

O fenómeno da absorção deve-se à existência de trocas de energia entre a onda e os átomos de um determinado corpo, tendo como principal consequência o aumento da temperatura do corpo. Para uma camada de espessura infinitesimal (dx), a absorção processa-se de forma proporcional à intensidade radiante, dando origem a uma redução desta intensidade que se pode representar pela equação diferencial (2.3) (Jähne, 1997).

Se num determinado meio a radiação é atenuada tanto pela absorção como pela dispersão, os dois efeitos podem ser combinados através do designado coeficiente de extinção $K(\lambda)$:

$$K(\lambda) = \alpha(\lambda) + \beta(\lambda) \quad (2.7)$$

2.2.3 - Transmissividade da atmosfera

A **transmissividade da atmosfera** $TR(\lambda)$, é uma medida da “transparência” da atmosfera à propagação da radiação electromagnética, estando relacionada com os fenómenos da absorção e da dispersão. Para definir a espessura óptica da atmosfera recorre-se à noção de espessura óptica (2.8), que corresponde à integral do coeficiente de absorção num determinado percurso. Como na atmosfera a radiação incidente é não apenas absorvida, mas também dispersa, substitui-se, em (2.3), $\alpha(\lambda)$ por $K(\lambda)$ que conjuga os efeitos provocados pela dispersão e pela absorção (2.7). A espessura óptica da atmosfera $\tau a(\lambda)$ fica então determinada por:

$$\tau a(\lambda) = \int_0^{\infty} K(\lambda) dz, \quad (2.8)$$

Onde $K(\lambda)$ é coeficiente de extinção da atmosfera e z - altitude (varia entre 0 e $+\infty$, correspondendo o valor nulo à superfície terrestre).

Em termos práticos quanto mais elevada for a espessura óptica, maior será a quantidade de energia emitida, por exemplo pelo Sol, a atingir a superfície terrestre. Nem toda a radiação atravessa a atmosfera, o que não representa nenhum dado novo, na medida em que é do conhecimento comum que esta serve como de filtro de protecção do planeta. O que é premente saber neste caso é o grau com que a radiação electromagnética é filtrada à medida que se propaga através da camada atmosférica, o que nos é facultado pela sua espessura óptica. Considerando um percurso perpendicular à superfície terrestre é possível relacionar a transmitância com a espessura óptica através da expressão (Fonseca, 1999):

$$TR(\lambda) = \exp(-\tau a(\lambda)) \quad (2.9)$$

À semelhança do que se verifica no caso da difusão também a espessura óptica da atmosfera é fruto de vários factores, traduzindo-se pela conjugação de três tipos de espessura: a que está relacionada com a dispersão originada por aerossóis e por isso designada de espessura óptica de *Mie* (τa_{Mie}), a que decorre em função da dispersão por moléculas de gases e por isso denominada de espessura óptica de *Rayleigh* (τa_{Ray}) e por fim a espessura óptica resultante da absorção selectiva originada pelos gases (O_2 - CO_2 que actuam conjuntamente, e O_3 cujo comportamento se faz sentir de forma independente dos outros dois) e vapor de água (H_2O) que compõem a atmosfera (τa_{Abs}).

Quando a transmissão se dá através de meios de densidades diferentes (e.g. diferentes camadas da atmosfera), ocorrem alterações na velocidade e direcção de propagação da energia. Neste caso a energia incidente no ângulo θ_1 ao encontrar um meio de densidade diferente, vai ser transmitida ao longo desse meio numa direcção θ_2 . A relação entre a velocidade de propagação da energia electromagnética no vácuo (c) e na substância (c_s) é definida por **índice de refacção** do material (n) e expressa-se através da equação:

$$n = \frac{c}{c_s} \quad (2.10)$$

Quando o feixe transita entre dois meios de índice de refacção diferente ocorre, na superfície de separação dos meios, o processo conhecido como refacção e que origina

fluxos de energia indirecta. De acordo com a **lei de Snell** a relação entre o ângulo de incidência (θ_1) e o ângulo de refacção (θ_2) é dada por:

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.11)$$

onde n_1 e n_2 são respectivamente os índices de refacção dos meios 1 e 2.

A Emissão, a Reflexão e a Dispersão são designadas de fenómenos de superfície, na medida em que dependem principalmente das características exteriores dos objectos (como por exemplo a rugosidade), podendo ser medidas externamente. A Transmissão e a Absorção dependem essencialmente das características internas dos objectos (tais como a densidade e condutividade, a composição geoquímica ou a estrutura biológica interna) não podendo ser medidas externamente e sendo por estas mesmas razões designadas de fenómenos de volume.

2.2.4 - Radiação Directa e Indirecta

A radiação que se encontra disponível à superfície terrestre é designada de **radiação global**, sendo constituída por duas componentes: a radiação directa e a radiação difusa.

A **Radiação Directa** é a radiação que provém directamente do Sol, percorrendo a atmosfera sem ser reflectida, absorvida ou refractada, *i.e.*, corresponde à fracção de radiação solar que atinge a terra sem qualquer mudança de direcção (Figura 2.4).

Por seu lado a **Radiação Difusa** chega aos dispositivos através da difusão, nas moléculas de ar e partículas de pó, da radiação reflectida pelos vários “objectos” existentes na superfície terrestre e por esta própria (Figura 2.4).

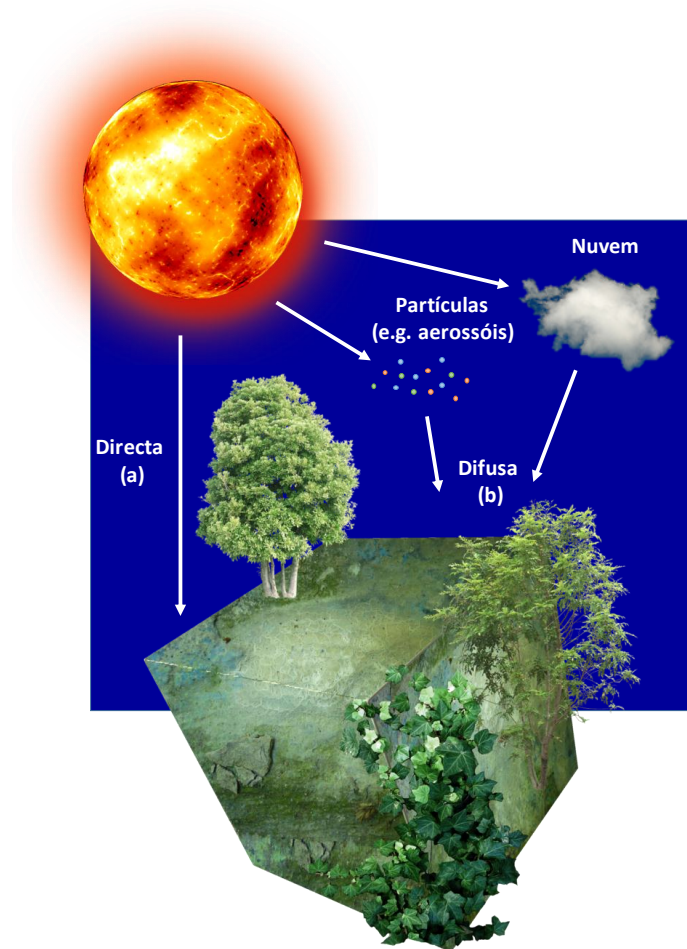


Figura 2.4 - Percursos da radiação solar a) radiação directa b) radiação difusa (Sen, 2008)

Da soma dos valores correspondentes à radiação solar directa com os valores da radiação difusa obtém-se o valor da **radiação global** para uma superfície horizontal, utilizada na maioria das situações para a avaliação do potencial de energia solar disponível num determinado local. No entanto, uma parte desta radiação será ainda reflectida pela superfície do solo, estando dependente da sua própria natureza e do albedo. Por albedo entende-se a relação entre a radiação reflectida e a recebida, expressa geralmente em percentagem. Quanto maior for a percentagem maior será a capacidade de reflexão da superfície (Figura 2.5).

Em condições de céu limpo a direcção dos raios solares não sofre desvios significativos, *i.e.*, prevalece a componente directa. Quando o céu não se encontra sob estas condições, existindo nuvens ou um maior nível de impurezas, a radiação solar é na sua

maioria difusa. Em Portugal, em termos anuais, a proporção de radiação difusa é cerca de 40% a 60% da radiação directa (GREENPRO, 2004).

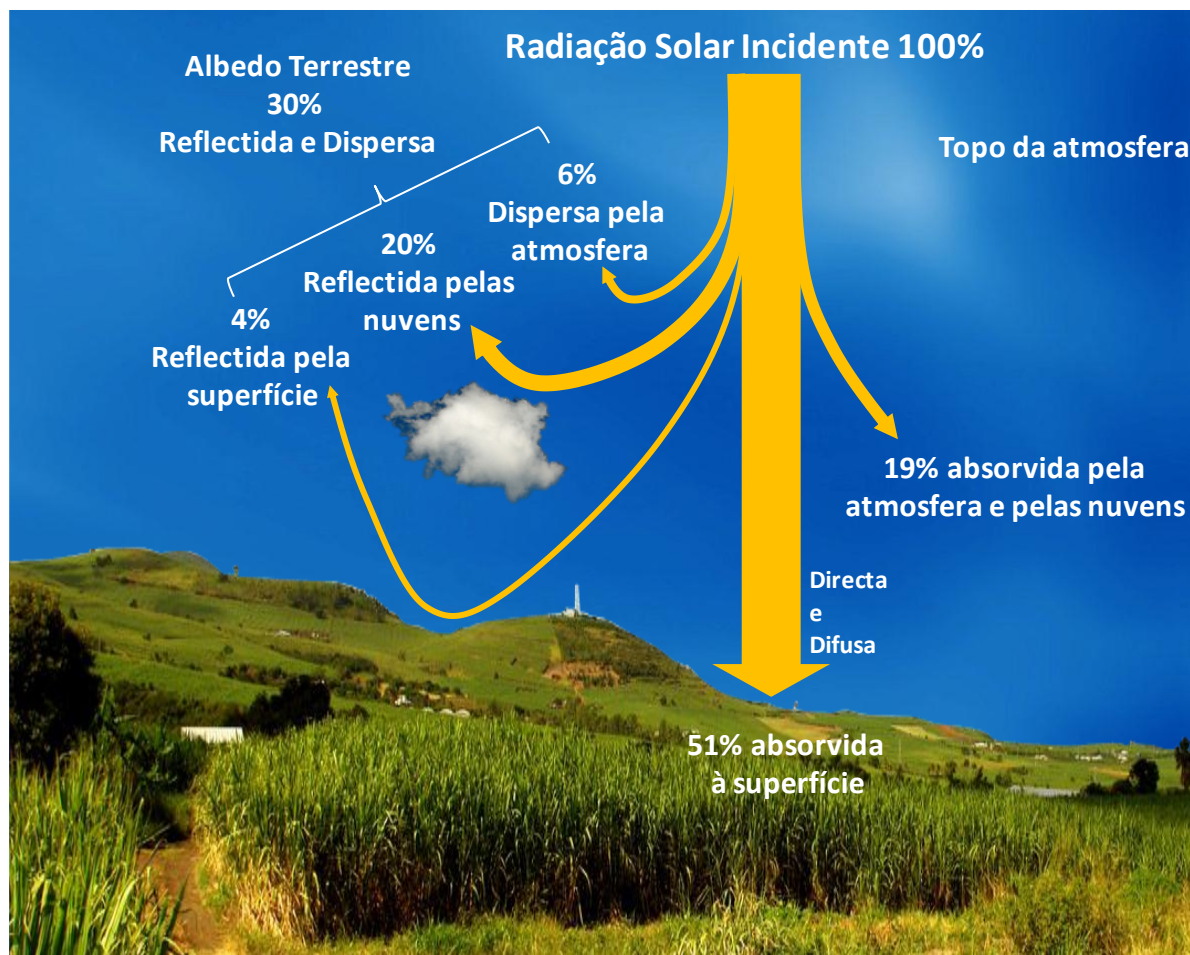


Figura 2.5 - Radiação Global (Ahrens, 2009)

2.2.5 - Variação da radiação solar

Quando falamos de energia solar podemos falar em energia solar integrada ou instantânea. No caso da energia solar integrada referimo-nos à irradiação solar, expressa em energia por unidade de tempo por área, usando-se normalmente Wh/m^2 ou kWh/m^2 . Há ainda quem apresente a irradiação (energia) solar anual em horas de Sol. Estas unidades resultam da divisão da energia solar anual ($\text{kWh/m}^2/\text{ano}$) pela energia de uma hora de Sol padrão (por convenção corresponde a 1kWh/m^2). Já quando nos referimos à energia solar

instantânea expressamos a potência da radiação solar, que é normalmente apresentada com unidades de potência por unidade de área, tipicamente W/m^2 ou kW/m^2 .

A irradiação solar num determinado local depende de diversas variáveis como, por exemplo, a localização geográfica, a época do ano, a hora do dia, poluição, sombreamentos entre outros.

Existem diversos factores que condicionam a distribuição e quantidade de radiação solar que atinge determinado local do planeta. A Terra não é completamente esférica, mas sim ligeiramente achatada nos pólos, de forma que o raio medido entre os dois pólos, Norte e Sul, é 22,5 km mais curto que o medido sobre o equador. Deste modo, a distribuição da radiação pela superfície terrestre não é igual durante todo o ano, estando sobretudo condicionada pela **forma quase esférica da terra**, pelo **movimento de rotação**, a **inclinação do eixo de rotação** sobre o plano da elíptica e o pelo próprio movimento aparente do Sol, o **movimento de translação**.

Assim, para compreender o movimento da Terra (movimento aparente do Sol) esta deve ser entendida como um objecto deformável, provido de um movimento de rotação (em torno do seu próprio eixo) e de um movimento de translação (órbita em torno do Sol).

O movimento de rotação dura cerca de 24 horas (23h 56m 0,41s) durante as quais a Terra dá uma volta completa em torno de um eixo imaginário que passa pelos pólos. Esta rotação processa-se de Oeste para Este e é o fenómeno responsável pela existência dos dias e das noites. O movimento de translação corresponde à revolução que a Terra efectua em torno do Sol, descrevendo uma órbita elíptica (quase circular) de pequena excentricidade (raio orbital aproximado de 150 000 000km), num período de 365 dias e quase $\frac{1}{4}$ (365 dias, 5 horas, 48 minutos e 47,46 segundos), daí os anos bissextos. Devido à natureza elíptica da sua órbita, a distância entre a Terra e o Sol varia ao longo do ano, atingindo o **periélio**⁴ no princípio de Janeiro (145 700 000km) e o **afélio**⁵ nos primeiros dias de Julho (151 800 000km).

⁴ O periélio (ou perélio), que vem de peri (à volta, perto) e hélios (Sol), é o ponto da órbita de um corpo, seja ele planeta, planeta anão, asteroide ou cometa, que está mais próximo do Sol.

⁵ Afélio (do latim *aphelium*, que quer dizer longínquo), é o ponto da órbita em que um planeta ou um corpo menor do sistema solar está mais afastado do Sol.

A circunferência resultante da intersecção entre o plano orbital terrestre e a esfera celeste⁶ é conhecida como **eclíptica** (assim chamada por que os eclipses ocorrem quando a Lua, cheia ou nova, se encontra sobre essa linha) que corresponde ao caminho aparente do Sol na esfera celeste ao longo do ano, segundo o qual este se desloca do hemisfério sul para o hemisfério norte.

O plano da eclíptica faz um ângulo de aproximadamente $23,30^\circ$ ($23^\circ 27'$) com o equador celeste (plano do equador terrestre), cujo valor varia ligeiramente ao longo do tempo, sendo designado por **obliquidade da eclíptica**. A intersecção entre estes dois planos (equador celeste e eclíptica) forma uma recta de direcção aproximadamente constante ao longo de cada período orbital da Terra, vulgarmente conhecida por **linha dos equinócios** (Figura 2.6). Os dois pontos de intersecção entre a linha dos equinócios e a esfera celeste são chamados de **pontos equinociais**. O ponto obtido através da intersecção no sentido da constelação de Áries (Carneiro) é conhecido por **primeiro ponto de Áries**, ou por **equinócio vernal**, ou ainda, por **ponto Vernal**.

A Terra encontra-se entre o Sol e o ponto Vernal no dia 21 de Março, coincidindo esta data com o equinócio de primavera no hemisfério Norte e com o de Outono no hemisfério Sul; é a partir deste ponto que começa a ser contada a ascensão recta (marca a origem da ascensão recta) em direcção ao leste. O **meridiano zero celeste**, que passa por esse ponto, recebe o nome de **coluro equinocial**. O Sol efectua duas passagens aparentes sobre todos os meridianos, designadas por **trânsito superior** e **trânsito inferior**, quando a passagem se processa pelo lado do observador terrestre ou pelo lado oposto, respectivamente.

Devido à inclinação constante do eixo de rotação da Terra de $23^\circ 27'$ em relação ao plano da órbita em torno do Sol altera continuamente o ângulo de incidência dos raios solares à medida que a Terra completa a sua órbita, fazendo com que os raios solares não atinjam sempre a linha do Equador de forma directa. O paralelo exacto que recebe os raios

⁶ Considera-se a esfera celeste um modelo de céu formado pela superfície de uma esfera, imaginária, centrada na Terra. Todos os astros (Sol, Lua, planetas, estrelas, cometas, etc.) estão localizados sobre a esfera celeste. O seu raio é considerado muito maior do que as dimensões da Terra. Apesar das distâncias de diferentes astros à Terra variarem, todos são considerados como situados sobre a esfera, tendo, portanto, uma posição aparente sobre esta. A posição de um astro relativamente a outro na esfera celeste pode ser, e é, definida usando coordenadas angulares.

solares de forma mais directa varia conforme o planeta gira em torno do Sol, ora estando a Norte ou a Sul do Equador.

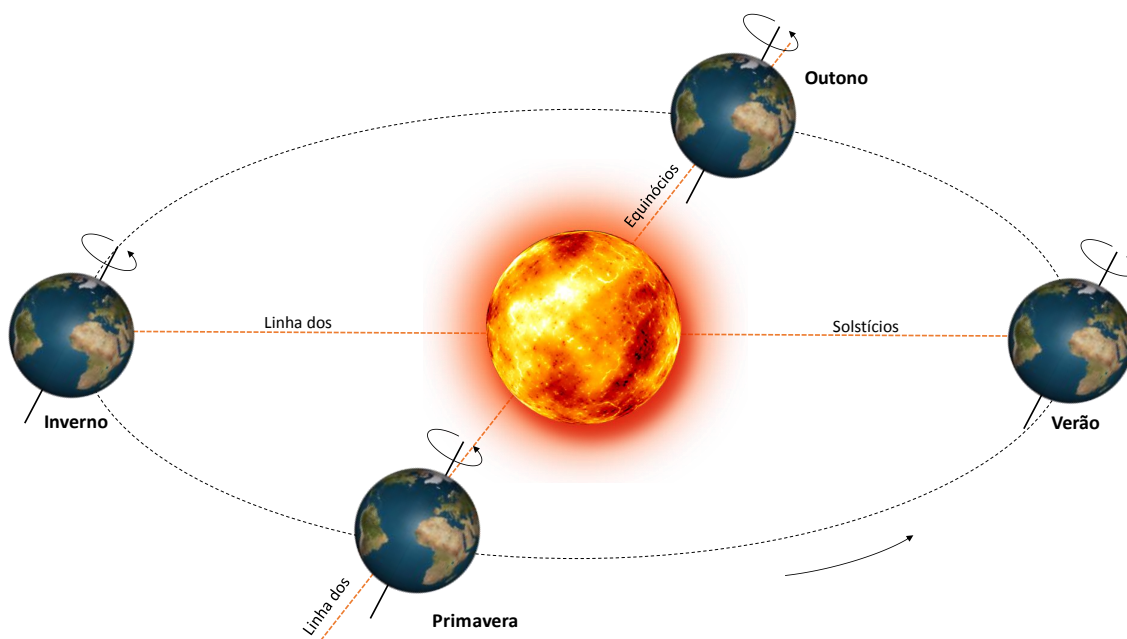


Figura 2.6 - Órbita Terrestre em Torno do Sol

Existem quatro dias com especial significado na variação anual dos raios solares em relação à Terra, são estes os equinócios e os solstícios. Os solstícios correspondem aos dois pontos da órbita em que o efeito da inclinação do eixo da Terra é máximo (Figura 2.6), já nos equinócios esse efeito é mínimo. No dia 21 de Dezembro, os raios solares incidem perpendicularmente à latitude de $23^{\circ}27'S$ (Trópico de Capricórnio) este marca o solstício de Verão para o hemisfério sul e de Inverno para o hemisfério norte, já a 21 Junho, os raios incidem perpendicularmente à latitude de $23^{\circ}27'N$ (Trópico de Câncer), marcando o solstício de Verão para o hemisfério norte e o de Inverno no hemisfério sul. Entre os solstícios ocorrem os equinócios, onde os dias e noites têm igual duração correspondendo exactamente a doze horas em qualquer ponto da Terra, durante os quais os raios solares atingem verticalmente o equador. No hemisfério norte o equinócio da Primavera ocorre a 21 ou 22 de Março e o de Outono a 22 ou 23 de Setembro (Peixoto, 1981).

Portugal, localizado no hemisfério norte, recebe menor quantidade de radiação solar no solstício de Inverno. Nessa altura, o Sol nasce relativamente próximo da orientação sudeste e põe-se relativamente próximo da orientação sudoeste. No solstício de Verão, o Sol

nasce relativamente próximo da orientação nordeste e o ocaso acontece relativamente próximo da orientação Noroeste. Nesta época do ano, a altura do Sol apresenta os valores mais elevados de todo o ano assim com regista o dia de maior duração aumentando o tempo de exposição aos raios solares e os valores de radiação.

Já a quantidade de radiação solar que atinge uma determinada superfície, depende sobretudo da latitude, pois este factor define a maneira como os raios solares atingem a superfície terrestre. A Latitude é o ângulo entre o plano do equador à superfície de referência, *i.e.*, é a distância ao Equador medida em graus ao longo do meridiano de Greenwich, podendo variar entre 0° (no equador) e 90° para Norte ou para Sul. A latitude vai influenciar a localização exacta do Sol, definida pela sua altura e azimuth. Por convenção, o azimuth de 0° ($\alpha = 0^{\circ}$) identifica o Sul, os ângulos orientados a Este e a Oeste correspondem respectivamente ao $\alpha = -90^{\circ}$ e $\alpha = 90^{\circ}$. A altura solar varia entre 0° (horizontal) e 90° (zénite) (Peixoto, 1981).

À medida que aumenta a latitude aumenta também a obliquidade dos raios solares vai crescendo. Consequentemente, aumenta a espessura da atmosfera a transpor e a superfície aquecida, diminuindo a radiação solar recebida por unidade de superfície. A uma escala local, a topografia é o principal factor de variação da radiação incidente. Uma vez que a própria elevação e a inclinação (declive e orientação) geram diversos sombreamentos originando diversos gradientes de radiação. Ao contrário da latitude que se mantém fixa ao longo de todo o ano, a posição exacta do Sol (altura e azimuth), *i.e.*, a trajectória do Sol não só varia ao longo do ano (tropico de Câncer- tropico de Capricórnio) mas também numa base diária, influenciando assim a quantidade de radiação solar incidente. Durante todo o ano são as vertentes e fachadas orientadas a Sul (no hemisfério Norte) que recebem mais radiação em oposição àquelas que estão orientadas a Norte.

Quando o Sol se localiza verticalmente acima de uma determinada localização, *i.e.*, no zénite, a radiação efectua o caminho mais curto através da atmosfera. Por outro lado, quando o Sol se encontra num ângulo mais baixo, a radiação percorre um caminho mais longo, sofrendo a radiação solar uma maior absorção e difusão, traduzindo-se numa menor intensidade de radiação disponível (GREENPRO, 2004).

O número de dias em que o Sol se encontra alto no céu (maior angulo solar) diminui de Sul para o Norte, ao passo que aumenta o período em que a sua trajectória não

ultrapassa a metade inferior do hemisfério celeste. A nebulosidade também influencia a disponibilidade da radiação solar e consequentemente a quantidade de radiação difusa e directa varia consoante a percentagem de cobertura de nuvens (GREENPRO, 2004).

A Figura 2.7 mostra a variação sazonal da radiação solar em Portugal sendo que os valores da radiação aumentam, em geral, de norte para sul, verificando-se também, sobretudo na região central, um aumento no sentido oeste-este. O aumento da radiação global de norte para sul é mais acentuado no Inverno (Figura 2.7 a), enquanto a variação oeste-este é mais notória no Verão (devido à nebulosidade) (Figura 2.7 b). Na totalidade do ano (Figura 2.7 c), os valores mais elevados encontram-se também no Sul, com uma inflexão para norte, pelo vale inferior do Tejo e até ao vale do Mondego. Os valores mais baixos estendem-se, agora, a todo o extremo Norte.

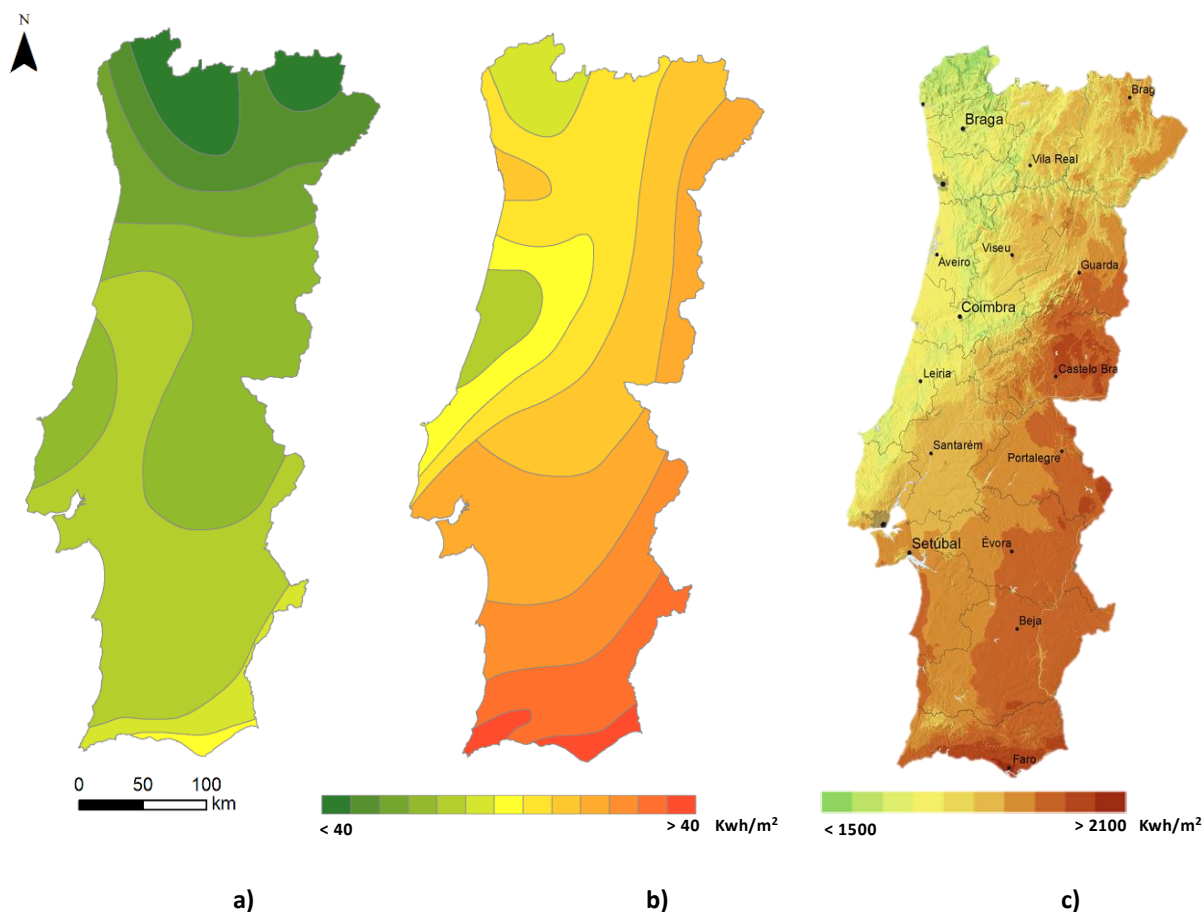


Figura 2.7 - Distribuição sazonal da Radiação Global em Portugal Continental

(http://aprendegeografia.no.sapo.pt/recursos_radiacao_solar.html)

Capítulo 3 - Modelos Solares

A radiação solar que atinge a superfície terrestre é o resultado de complexas interações de energia entre a atmosfera e a superfície (Dubayah & Rich 1995; Hofierka & Sári 2002). Nas últimas décadas têm sido desenvolvidos diversos modelos para estimar a radiação solar (Dozier, 1980; Dubayah, 1992; Fu & Rich 1999; Piedallu & Gégout 2007). Contudo, esta é uma tarefa complexa, uma vez que, a radiação solar é sucessivamente modificada, numa fase inicial pela própria atmosfera e, posteriormente, pelas características topográficas locais da superfície (Rich, Hetrick & Saving, 1995).

Segundo Rich, Hetrick e Saving (1995) e como já mencionado no capítulo 2, existem três componentes a ter em consideração quando queremos estimar a radiação solar:

- A radiação directa, proveniente do Sol e que incide directamente na superfície terrestre sem sofrer qualquer modificação.
- A radiação difusa, que ao penetrar na atmosfera sofre dispersão (*Rayleigh*, *Mie* ou não selectiva) por parte das moléculas da atmosfera, como por exemplo, O₃, H₂O, O₂, CO₂ e partículas de pó em suspensão.
- A radiação reflectida que consiste na reflexão da radiação directa e difusa pelo próprio terreno envolvente.

Os modelos solares, baseados em equações empíricas (Demain, Journée & Bertrand, 2013), permitem estimar a radiação solar tomando em consideração as características da própria atmosfera, da inclinação da superfície terrestre, da orientação e do sombreamento. Estes modelos procuram representar a realidade de uma forma mais simplificada, numa tentativa de entendermos a complexidade das trocas de energia entre a atmosfera e a superfície. Assim, um modelo solar deverá contemplar não só as interações *Sol-Atmosfera* mas também *Superfície-Atmosfera*. Nos últimos anos, todas estas interações têm sido incluídas nos mais diversos modelos de radiação solar, que por sua vez, têm sido integrados nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Hofierka & Sári, 2002). Devido à incapacidade de abranger/incorporar todas as interações existentes, actualmente, existe uma quantidade considerável de modelos de radiação solar, cada um com as suas valências específicas (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Modelos solares

Modelos de Radiação Solar			
	Modelos	Vantagens	Desvantagens
Pré-SIG	Algoritmo de Dozier (Dozier <i>et al.</i> , 1981)	.....	.....
	CLOUDY (Fleming 1987)	.....	.....
	ATM (Atmospheric and Topographic Model) (Dubayah 1992)	Estrutura modular dos programas e estrutura matricial	Não ser um SIG na realidade
1ª Geração	SRAD V.0 (Ian Moore et al., 1993)	Cálculo da radiação em vários comprimentos de onda e a utilização de parâmetros médios mensais	Na modelação de áreas extensas torna-se limitado
	SOLARFLUX (Rich et al., 1993)	Estrutura de dados matricial; interface atractivo e grande variedade de outputs	Limitado a nível computacional e gráfico
	SOLEI 32 V.0 (Miklának & Mészáros, 1993)	.....	.....
	Programa de Kumar (Kumar, Skidmore & Knowles, 1997)	Linguagem de programação de fácil obtenção e o curto tempo de processamento	Parâmetros de calibração limitados
SIG	SRAD (Wilson & Gallant, 1997)	A sua aplicação em modelos 3 D	Disponibilização difícil
	R.sun V.0 (Horfierka, 1997)	Flexibilidade do algoritmo de cálculo	Elevado tempo de processamento
	Solar Analyst (Fu & Rich, 1999)	Resultados com diferentes geometrias (área, ponto e gráficos)	Elevado tempo de processamento e não inclui a cobertura de nuvens
	FORestGAP (Van Dam, 2000)	Estrutura matricial e algoritmo de programação	Interface pouco amigável
	SOLEI 32 (Miklának & Mészáros, 2002)	.....	.....
	Toporad (Kang, Kim & Lee, 2002)	Elevado rigor em áreas de montanha	.....
	R.sun (Horfierka & Sári, 2002)	Open Source	.....
	ICUE (Mardaljevic & Rylatt, 2003)	Ideal para modelar ambientes urbanos; determinar a intra-reflexão de edifícios	Interface pouco amigável
	HELIOS (Piedallu & Gégout 2007)	Adaptação a diversas escalas de análise	Utilizados provenientes de estações meteorológicas
	Pons & Ninyerola, 2008	.....	.....
Web-SIG/ híbridos e Nova Geração	PVGIS	Disponibilização gratuita e elevada resolução espacial (1 km x 1km)	Todas as que estão associadas ao modelo base (R.sun)
	SolarGIS	Resolução Espacial	Custo
	Solar Shading	Portabilidade, cálculos precisos, respostas imediatas e facilidade de armazenamento da informação	Custo
	Easy Solar		
	Sunny Portal		
	Onix Solar		

Efectivamente, cada um destes modelos existentes procura especializar-se em um ou mais componentes destas interacções (e.g. modelos onde as interacções atmosféricas são as mais exploradas; modelos onde as interacções da superfície são mais valorizadas, ou modelos que só procuram incluir o máximo de interacções possíveis). Como tal, ao longo dos próximos subcapítulos não se pretende fazer uma descrição exaustiva de todos os modelos descritos pela literatura, mas sim focar aqueles que tanto a nível académico como empresarial se têm destacado no estudo desta temática.

Ao longo destes pontos tenta-se estabelecer sempre que possível uma linha cronológica dos diversos modelos onde são descritas ainda que de uma forma breve as suas características, objectivos de desenvolvimento e evolução, destacando-se sempre que possível o contexto de aplicação dos trabalhos desenvolvidos, e destacando as suas vantagens e desvantagens.

3.1 - Modelos Solares Pré-SIG e de 1ª Geração

Uma das primeiras tentativas de integrar um modelo solar num SIG foi o *Atmospheric and Topographic Model (ATM)*, (Dubayah 1992), composto por um conjunto individual de programas escritos numa linguagem de programação *UNIX Shell*, uma característica que possibilita, em qualquer momento de execução do modelo, alterar a sua *interface* (Dubayah & Rich, 1995). Cada um dos programas incorpora o *Image Processing Workbench (IPW)*, um *software* de processamento digital de imagens, desenvolvido para atender às aplicações gerais de detecção remota no processamento digital de imagens onde todos os dados IPW são armazenados em formato ASCII (Frew, 1990).

Um dos principais objectivos no desenvolvimento do ATM foi o de fornecer dados de *input* para modelos hidrográficos e *snowmelt models* (modelos de fusão da neve) em ambientes de montanha. O ATM permite gerar modelos topoclimáticos detalhados para grandes bacias hidrográficas. Um exemplo da sua aplicação foi a modelação da bacia hidrográfica do Rio Grande no Colorado (EUA), onde a combinação de modelos digitais de elevação com imagens de satélite possibilitou a obtenção da radiação solar anual para a área em estudo (Dubayah & Rich, 1996). Apesar da sua base matricial, o facto de não “correr” em

nenhum ambiente particular (*e.g.* em ArcGIS), faz com que a sua implementação em SIG não seja directa. No entanto, estavam assim lançadas as bases para o desenvolvimento de modelos de radiação SIG (Dubayah & Rich, 1995).

Outro modelo a tentar incorporar a componente SIG foi o **SRAD**, inicialmente desenvolvido por Ian Moore *et al.* (1993) e mais tarde aprimorado por Wilson e Gallant (1997). O SRAD evoluiu a partir de dois modelos já existentes o **CLOUDY** (Fleming, 1987) que permite conhecer a posição do Sol, o efeito das nuvens/atmosfera e os efeitos da orientação e declive (Gallant, 1997); e o **Algoritmo de Dozier** (*fast horizon algorithm*) (Dozier *et al.*, 1981). Inicialmente o modelo calcula o potencial de radiação solar (radiação de ondas curtas e ou longas) de acordo com a latitude, declive, orientação, sombreamento e época do ano para cada célula do Modelo Digital de Elevação (MDE). Assim que a superfície de radiação é estimada, o SRAD utiliza uma série de parâmetros médios mensais como a transmissividade, a fracção de luz do Sol, para ajustar as estimativas anteriormente obtidas (Wilson & Gallant, 2000).

O facto de utilizar parâmetros médios mensais torna o SRAD adequado para aplicações em estudos biológicos e geológicos. Além disso apresenta a vantagem de proporcionar um balanço do total de radiação (Ruiz-Arias *et al.*, 2009). O modelo tem sido aplicado em diversos estudos, como por exemplo, na Alemanha (Reuter, Kersebaum & Wendroth, 2005), no Parque Nacional da Serra Nevada a Sudeste da Espanha (Ruiz-Arias *et al.*, 2009) ou mesmo na Austrália (Austin, Gallant & Van Niel, 2013). Apesar de projectado para modelar processos topográficos de mesoescala, o cálculo sobre grandes territórios e com elevada complexidade é limitado (Ruiz-Arias *et al.*, 2009). No entanto, existe sempre a possibilidade de ser actualizado e melhorado uma vez que actualmente a versão do SRAD está implementada em *Interactive Data Language* (IDL), que em comparação com versões anteriores escritas em FORTRAN, permite que seja facilmente modificado, estando em constante evolução (Austin, Gallant & Van Niel, 2013).

Um outro modelo solar integrado num SIG, foi o **SOLARFLUX**, muitas vezes referenciado na literatura como o primeiro modelo com implementação SIG (Hofierka & Sári, 2002; Ruiz-Arias *et al.*, 2009). Este modelo encontra-se implementado em ArcGIS numa plataforma da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) e foi escrito numa linguagem de programação própria, a ARC Macro (AML), que ao contrário do verificado nos modelos

ATM, SRAD e CLOUDY, capacita este modelo de numerosas operações SIG (Dubayah & Rich, 1996). Inicialmente criado por Hetrick *et al.*, (1993) e, posteriormente, desenvolvido e corrigido por Rich, Hetrick & Saving (1995), este modelo permite calcular a radiação solar com base na orientação da superfície, ângulo solar, sombreamento causado pela topografia e pelas condições atmosféricas. O resultado é uma matriz onde são assinalados para cada célula os valores de insolação correspondentes durante o intervalo de tempo especificado.

O SOLARFLUX permite ainda obter *outputs* como a radiação directa total, a duração da luz solar directa, a radiação difusa total, o *Skyview Factor* (proporção de céu não obstruída) e ainda o *Viewshed* ou visão hemisférica (obstrução do céu para locais específicos a superfície). Alguns estudos têm sido desenvolvidos recorrendo ao SOLARFLUX, especialmente nos Estados Unidos. Um desses estudos consistiu no desenvolvimento do modelo de insolação de *Spring Mountains* – Nevada, na Califórnia. Foram ainda criados mais dois modelos de insolação, um na reserva do *Big Creek* e outro no Parque Nacional de *Los Alamos*, entre outros referenciados por Rich, Hetrick e Saving (1995). Uma das vantagens do SOLARFLUX, para além da sua componente de cálculo matricial a qual permite o desenvolvimento de um algoritmo já bastante complexo do ponto de vista computacional, é também o interface amigável onde a introdução dos parâmetros de calibração é bastante intuitiva, aliado à variedade de *outputs* que é capaz de gerar, fazendo do SOLARFLUX um modelo robusto, ainda que limitado.

Um modelo similar, desenvolvido por Kumar, Skidmore e Knowles (1997), é o **GENASYS**, como é mais frequentemente identificado. Este modelo implementa o modelo desenvolvido em 1960 por Liu & Jordan, explicado por Gates (1980) e conforme citado em Néry e Matos (2005). Também conhecido como **modelo de Kumar**, foi desenvolvido para ser aplicado a trabalhos na esfera da silvicultura e agricultura, onde a variação da radiação solar é mais importante que os valores calibrados. Este algoritmo utiliza um Modelo Digital de Elevação (MDE) para calcular tanto o potencial solar da radiação directa como o da radiação difusa simples para uma extensa área, embora o modelo possa ser modificado/adaptado para incluir mais parâmetros (*e.g.* a cobertura de nuvens ou teor de água precipitável na atmosfera) (Kumar, Skidmore & Knowles, 1997).

À semelhança do SOLARFLUX, o GENASYS utiliza uma linguagem AML (ARCINFO), no entanto “corre” em *Genamap*, um *software* SIG da empresa GENASYS⁷. Uma das desvantagens deste modelo é a sua limitação na parametrização. No entanto, o facto de ser bastante simples, intuitivo e relativamente rápido nos cálculos que efectua (*i.e.*, raramente excede as 24 horas de processamento, segundo a informação disponibilizada no sítio de *download*) torna-o num modelo ideal para efectuar modelações simples sem recurso a grandes parametrizações. Vários estudos têm sido desenvolvidos com recurso a este programa, não só em New South Wales (Austrália) (Kumar, Skidmore & Knowles, 1997), mas também na Península Ibérica (Néry & Matos, 2005) e, mais recentemente, em Lisboa, com aplicação de um modelo 3D a uma área do Campus da Universidade de Lisboa (Redweik, Catita & Brito, 2011). Como se pode verificar, dada a facilidade com que este modelo permite adaptar o seu código, faz com que este possa ser aplicado às mais diversas escalas de análise.

Por fim, o modelo **SOLEI-32**, inicialmente desenvolvido no *Institute of Hydrology of Slovak Academy of Science* por Miklánek e Mészáros (1993) e, posteriormente, reprogramado e desenvolvido por Mészáros, Miklánek e Parajka (2002). Criado com o objectivo de estimar o potencial solar, em áreas de significativo relevo, diferentes exposições e sombreamento, permitindo o cálculo da evapotranspiração potencial segundo a equação de *Penman-Monteith* (Mészáros, Miklánek & Parajka, 2002), este é um modelo autónomo programado em ambiente *MS Windows* e ligado ao *software* IDRISI através do seu formato dos dados.

O SOLEI-32 utiliza uma matriz de dados altimétricos, MDE, como dados de entrada, sendo possível introduzir informação referente à cobertura do solo (vegetação), albedo e dados meteorológicos, sendo que estes consistem num ficheiro com os valores da duração do dia, temperatura, vento, humidade relativa e vapor de água para todos os locais definidos na área de estudo. O resultado deste modelo é representado num mapa com os valores, separadamente, da radiação directa, difusa e reflectida. Posteriormente, também é possível obter o mapa da evapotranspiração (Ruiz-Arias *et al.*, 2009). Para além do estudo desenvolvido para testar a aplicabilidade e rigor dos resultados do SOLEI-32, nas Montanhas

⁷ Este software encontra-se disponível no seguinte *link*:
http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/aml1_1.html

de Tatra na Eslováquia (Mészáros, Miklánék & Parajka, 2002), também Ruiz-Arias *et al.*, (2009) no seu estudo comparativo aplicaram o SOLEI-32 a uma área do Parque Nacional da Serra Nevada no Sudeste de Espanha.

Os modelos como o **ATM** e o **CLOUDY** foram os protótipos da geração de modelos que viriam a incorporar na sua totalidade a componente SIG. Estes primeiros modelos SIG de formulação empírica simples como o **SOLARFLUX**, o **Programa de Kumar**, o **SOLEI**, ou mesmo, o **SRAD** (primeiras versões) foram os primeiros pensados e desenvolvidos para serem Sistemas de Informação Geográfica, servindo de base para o desenvolvimento dos modelos de nova geração necessários para proporcionar maior velocidade de cálculo, maior rigor e precisão, maior flexibilidade e maior disponibilidade (Fu & Rich, 2000 b).

3.2 - Modelos Solares SIG

O primeiro modelo solar SIG foi desenvolvido por Fu e Rich (1999). O **Solar Analyst**, como foi designado, permite calcular a irradiação (WH/m^2) para uma determinada área geográfica e para um determinado período de tempo, levando em consideração os efeitos atmosféricos, a latitude, a elevação, o declive, a orientação, o movimento aparente do Sol e o efeito das sombras projectadas (Santos *et al.*, 2011). Actualmente, encontra-se inserido na caixa de ferramentas *Spatial Analyst Tools* do ArcGIS com a designação de *Solar Radiation*, que à semelhança da generalidade dos modelos solares, possibilita a análise da radiação solar de duas formas distintas, por pontos ou em área (Tovar-Pescador *et al.*, 2006).

O método de radiação solar por pontos calcula a irradiação para um local específico, com base na orientação da superfície e o céu visível. Muito embora a precisão deste método seja bastante elevada, este apenas abrange o local determinado, impossibilitando assim a aplicação deste método na construção de um modelo que inclua uma área significativa. Por sua vez, o método de radiação por área possibilita o cálculo mais abrangente da irradiação incidente considerando também a superfície de orientação e as sombras originadas pelo modelo digital de elevação (Fu & Rich, 2000 a).

Em suma, estes dois métodos permitem calcular a irradiação solar através de geometrias distintas (pontos e áreas) No entanto, o *Solar Analyst/ Solar Radiation* possibilita também a representação gráfica do céu que se encontra desobstruído (*viewshed map*), a

representação gráfica da posição do Sol durante um certo período de tempo (*sunmap*) e a representação do sector ou sectores no céu que vão influenciar o total de radiação incidente (*skymap*). Esta representação é possível graças ao método *Solar Radiation Graphics* disponível também na extensão do *Solar Radiation* (Tovar-Pescador *et al.*, 2006).

Uma das principais vantagens do *Solar Radiation*, são os cálculos precisos obtidos através de algoritmos baseados em linguagem C++, juntamente com o uma *interface* intuitiva, aliado à produção versátil de dados de radiação solar directa, difusa e global. Através de diferentes características (*e.g.*, geometrias, duração da radiação directa, posição do Sol (*sunmap*), sectores do céu que mais influenciam o total de radiação incidente (*skymap*), quantidade de céu não obstruído (*viewshed map*), obtidas através de um modelo digital de elevação e da introdução de alguns parâmetros atmosféricos (*e.g.*, transmissividade e proporção difusa) este método possibilita o cálculo da radiação para um período de tempo específico (horário, diário, semanal ou mensal), para qualquer área (Fu & Rich 1999).

Se por um lado este modelo apresenta numerosas vantagens, por outro, também se lhe apontam algumas desvantagens, sobretudo no que diz respeito ao tempo de processamento e cálculo. Efectivamente, a precisão e qualidade dos resultados está directamente relacionada com a resolução adoptada no modelo, *i.e.*, ao aumentar a resolução do modelo não só se aumenta a sua exactidão, mas também o seu tempo de cálculo. No entanto, é possível encontrar um equilíbrio entre a resolução espacial e o tempo de processamento, tornando este modelo solar num dos mais utilizados, sendo aplicado a diferentes áreas e escalas de estudo. *e.g.* *Rocky Mountain Biological Laboratory*, no estado do Colorado, Estados Unidos (Fu & Rich 1999), Parque Natural da Serra Nevada, Espanha (Tovar-Pescador *et al.*, 2006); Omã, Península Arábica (Gastli & Charabi, 2010) ou à escala da topografia urbana (Brito *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2014).

Horfierka e Sári (2002), baseando-se no trabalho prévio de Horfierka (1997), também desenvolveram um novo modelo, o **R.sun**. Este modelo surge no seio do projecto europeu para a criação do atlas de radiação solar europeu, o *European Solar Radiation Atlas* (Scharmer & Greif, 2000), uma vez que, ao analisar todos os modelos já discutidos foi necessário criar um modelo que desse respostas as limitações dos modelos anteriormente referidos, sendo as principais limitações o facto de todos eles estarem implementados em

softwares pagos e muitos dos parâmetros não se revelaram suficientemente flexíveis para os objectivos estabelecidos no projecto (Horfierka & Sári, 2002). Assim, o **R.sun** foi pensando para integrar um *software open source*, neste caso o *GRASS GIS*. A sua implementação num *software open source* e de código aberto (*General Public Licence [GNU]*) estabelece, à partida, uma base para futuros melhoramentos e eliminando assim algumas das limitações já discutidas nos modelos anteriores. Neste contexto sobressai o facto de ser pensado para funcionar com diversos conjuntos de parâmetros, proporcionando uma grande flexibilidade, uma vez que, podem ser usados de forma independente e em diversas aplicações. Por exemplo, o *r.sunyear* calcula a inclinação óptima para planos orientados a sul e o *r.horizon* é utilizado para otimizar o calculo de grandes áreas, permitindo saber o sombreamento, tendo em conta a curvatura da Terra e as distorções angulares causadas pelas projecções cartográficas (Horfierka & Cebecauer, 2008).

O modelo **R.sun** foi projectado para obter a insolação e a irradiação (tanto para condições de céu limpo como nublado) para qualquer superfície em qualquer região para um período específico de tempo. Funciona em dois modos, no primeiro resulta em mapas matriciais de radiação directa, indirecta e de irradiação solar reflectida obtido com base no angulo da radiação incidente que pode ser estimado para um determinado dia e hora. No segundo modo são “computados” os padrões espaciais dos valores diários de radiação solar e a duração em minutos da irradiação (Horfierka & Cebecauer, 2008).

Apesar de todos os cálculos complexos que efectua, o **R.sun** requer apenas cinco parâmetros de entrada obrigatórios, *e.g.*, valor da altitude, mapa de declive e exposição solar (os três obtidos através do MDE), hora solar local e o número do dia juliano. No entanto, o utilizador também pode alterar a configuração padrão de outros parâmetros, incluindo o factor de turbidez atmosférica, o albedo ou mesmo a configuração do céu visível (Horfierka & Sári, 2002).

O *European Solar Radiation Atlas* (Scharmer & Greif, 2000; Horfierka & Sári, 2002), é talvez a aplicação mais relevante do **R.sun**, contudo este tem sido aplicado em diversos estudos nas mais variadas áreas científicas. Um exemplo é a sua aplicação na ilha de Spitsbergen (arquipélago das Svalbard, na Noruega) fornecendo dados valiosos para estudos ecológicos, glaciológicos ou hidrológicos (Szymanowski *et al.* 2008). A uma escala mais regional, Horfierka e Cebecauer (2008) determinaram o potencial solar para 79 municípios

do território Eslovaco. Também na Eslováquia, mas desta vez à escala urbana foi estimado o potencial fotovoltaico para a cidade de Bardejov (Horfierka & Kanuk, 2009). O modelo **R.sun** pode ser considerado como uma ferramenta SIG robusta e muito flexível no que respeita a modelação da radiação. A sua principal vantagem é a simplicidade relativamente aos dados de entrada. Contudo, ter uma codificação aberta não significa que consiga acelerar o processamento de dados de alta resolução, especialmente, se incorporar o sombreamento do terreno, podendo neste caso revelar-se bastante moroso. A redução da qualidade do MDE de entrada não é uma opção, uma vez que esta é de especial importância para os resultados finais, especialmente para áreas montanhosas (Szymanowski *et al.*, 2008), o que acaba por limitar a aplicação deste modelo.

Todos os modelos referidos até este ponto, dizem respeito aos modelos mais citados ao longo de toda a bibliografia consultada. No entanto, nota-se uma lacuna na descrição dos modelos que foram emergindo a partir deste ponto (**R.sun**). Uma das possíveis razões, pode ser o facto de estes modelos permitirem uma já vasta adaptação às mais variadas áreas e conseguirem responder a cada uma das especificidades que possam vir a surgir do ponto de vista da modelação. A necessidade de procurar por soluções cada vez mais eficientes pode já não ser o principal foco, uma vez que, estes modelos conseguem responder de forma bastante satisfatória às tarefas solicitadas.

No entanto, no decorrer deste processo de pesquisa, acabaram por surgir mais alguns modelos como o **FORest GAP** (Van Dam, 2000) escrito em linguagem dinâmica PCRaster. O PCRaster consiste num conjunto de ferramentas para armazenar, manipular, analisar e recuperar dados geográficos, *i.e.*, o PCRaster é um SIG de estrutura matricial potenciado pela sua linguagem de programação que permite a construção de modelos espaciais dinâmicos e a sua aplicação é sobretudo a modelos hidrológicos e florestais.

O **Toporad** (Kang, Kim & Lee, 2002), é outro dos modelos modelo referenciado, desenvolvido com o intuito de espacializar os padrões resultantes da radiação diária com base na variação da topografia e temperatura diária, tendo sendo utilizado para modelar uma extensa área de montanha na península da Coreia.

O *Irradiation Mapping for Complex Urban Environments* (**ICUE**) foi desenvolvido no Instituto de Energia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Montfort (Leicester, Reino Unido) por Mardaljevic e Rylatt (2003), com o objectivo de simular a quantidade de

energia recebida em ambientes urbanos complexos, podendo quantificar a irradiação anual total com base em dados meteorológicos e quase sem limitação prática no que respeita a complexidade do tecido urbano. Este modelo é sobretudo utilizado na modelação da radiação incidente nas fachadas dos edifícios, permitindo ainda estimar o sombreamento e a inter-reflexão entre os mesmos. No entanto, a sua implementação em Linux e a sua interface gráfica pouco amigável faz com que a sua aplicação não seja tão difundida.

O **Helios** criado por Piedallu e Gégout (2007), desenvolvido em ArcGIS, combina parâmetros topográficos locais (*e.g.* declive, exposições e sombreamento) e globais (*e.g.* nebulosidade e altitude) permitindo estimar a radiação solar independentemente da escala de análise. Este modelo apenas exige um MDE e um ficheiro com os valores de nebulosidade que são facilmente medidos ou interpolados a partir dos dados das estações meteorológicas. O resultado deste modelo é determinado pelo cálculo de três factores: *i)* as relações geométricas entre o Sol e a superfície da terra calculada com base em fórmulas astronómicas; *ii)* os factores topográficos calculados através do MDE; e *iii)* a atenuação atmosférica. Piedallu e Gégout (2008) implementaram este modelo em França para obter os valores da radiação solar anual

Pons e Ninyerola (2008) desenvolveram um modelo de radiação solar que se encontra implementado no *software* SIG MiraMon. Este modelo tem em consideração factores astronómicos, atmosféricos e geográficos com o objectivo de obter mapas de radiação mensais. Os resultados da interpolação dos mapas de radiação foram integrados no Atlas climático digital da Catalunha.

Outra das razões que estão na origem da lacuna nas referências a modelos solares mais recentes pode dever-se à mudança de paradigma na evolução dos SIG e da internet, uma vez que, a constante evolução tecnológica fez nascer uma nova geração de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os SIG na internet (WebSIG), permitem, quase na totalidade, formulações matemáticas e cálculos dispendiosos do ponto de vista de processamento numa plataforma *online* que, outrora, existiam num SIG físico (instalado num computador de secretária). Os WebSIG são soluções que possibilitam o acesso de dados e análises espaciais, possuindo interfaces muito intuitivos que facilitam a sua utilização, possuindo ferramentas de produção rápida e directa de mapas, através do acesso remoto a servidores que possuem a informação necessária (Cosme, 2012).

Também os Modelos Solares SIG acompanharam esta mudança e, recentemente, têm surgido rápidos avanços no desenvolvimento de Modelos Solares Web (*Web-based solar estimation*). Estes WebSIG Solares incluem não só a modelação solar (radiação solar directa, difusa ou total) mas também o potencial fotovoltaico (PV), informando o público dos eventuais custos e benefícios associados ao uso da energia solar. Uma das vantagens destas plataformas SIG é, para além de libertarem espaço de armazenamento físico no *hardware*, o facto dos resultados obtidos pelas ferramentas web serem facilmente “ligados” a um SIG Solar físico. Muitos destes WebSIG Solares têm também um *software* físico, o qual é possível descarregar e utilizar, caso seja necessário modelar alguma área ou parâmetro que não se encontre contemplado na plataforma online. A maioria destes *softwares* é *open source*, *i.e.*, sem qualquer custo para o utilizador.

3.3 - Modelos Solares Web, híbridos e nova geração

Muitos dos modelos solares web podem-se considerar sistemas híbridos, *i.e.*, para além da plataforma *online* disponibilizam também um *software*, por norma *open source*, que permite efectuar uma modelação mais avançada caso os dados disponibilizados na plataforma não sejam suficientes.

O *Photovoltaic Geographical Information Systems*⁸ (**PVGIS**) do *Join Research Center* da Comissão Europeia é talvez o modelo mais conhecido, apresentando resultados bastante satisfatórios. À semelhança de outros sistemas de integração de dados (*e.g.*, Atlas Europeu de Radiação Solar, MeteoNorm, SoDa), o PVGIS é uma base de dados geográfica, disponibilizada a partir da internet. Inicialmente, esta base continha dados da radiação solar e temperatura do ar para a Europa e África e, posteriormente, a base foi alargada para a Ásia (*e.g.*, China, Índia, Indonésia, Rússia), permitindo calcular o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Na base teórica do PVGIS encontra-se o modelo solar já mencionado anteriormente o **R.sun** (Horfierka, 1997; Horfierka & Sári, 2002).

Este Sistema de Informação Geográfica Fotovoltaica fornece dois tipos de informação distinta: a informação genérica sobre a energia solar e o clima de uma determinada região, e

⁸ <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/download/download.htm>

a estimativa do rendimento potencial de um sistema fotovoltaico. A plataforma *online* do PVGIS⁹ permite, com um número mínimo de parâmetros (*e.g.*, coordenadas do local ou apenas nome da cidade), calcular mensalmente o valor de irradiação solar e estimar a produção de um sistema solar fotovoltaico, para uma determinada região. A plataforma *online* é uma das vantagens deste Sistema de Informação Geográfica Fotovoltaica. Outra das suas vantagens é a sua resolução espacial (1 km x 1 km), traduzindo-se numa maior exactidão, particularmente, em áreas montanhosas onde a qualidade dos dados é mais necessária, melhorando assim o cálculo das estimativas da radiação solar (Súri, Huld & Dunlop, 2005).

O **SolarGIS**¹⁰ (GeoModel) desenvolvido por Marcel Súri (R.sun e PVGIS) numa empresa com sede em Bratislava (Eslováquia), tem como objectivos o aumento da eficiência e redução da incerteza no desenvolvimento e fornecimento de serviços e na disponibilização de dados solares. Contudo, esta solução, ao contrário do PVSIG, não é *open source*. No entanto, a plataforma *online* do iMAPS¹¹ disponibiliza gratuitamente informação dos recursos solares (radiação directa e global); da temperatura (Graus Celsius a 2 metros do solo); da cobertura do solo (GLC2000) e da população (densidade populacional) com uma resolução espacial de 250 metros.

Esta informação seleccionada e disponibilizada permite efectuar comparações entre diversos locais, facilitando assim uma rápida identificação de localizações para a possível instalação de um projecto fotovoltaico. Apesar de o facto de ser uma solução paga parecer uma desvantagem, na verdade, este tipo de soluções permite um apoio e suporte técnico bem como um acompanhamento individual que as soluções *open source* não podem oferecer. Assim, uma das vantagens do *SolarGis* para além da elevada resolução espacial que apresenta é o acompanhamento, quase constante, ao utilizador do *software*¹².

Assim, actualmente a modelação solar já não se encontra circunscrita apenas a um *software* físico instalado em um qualquer computador ou a uma plataforma Web. A constante evolução tecnológica, a cada vez mais pertinente discussão e tomada de

⁹ <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=europe>

¹⁰ <http://solargis.info/>

¹¹ <http://solargis.info/imaps/>

¹² Veja-se: <http://www.prnewswire.com/news-releases/geomodel-solar-launches-new-generation-online-tools-for-solar-site-prospecting-and-bankable-photovoltaic-yield-assessment-137463408.html>

consciência para as questões da energia solar, e a sua consequente modelação, levaram ao desenvolvimento de aplicações *mobile* (*smartphones* e *tablets*). Estas soluções *mobile* utilizam não só as ferramentas disponibilizadas pelos algoritmos que compõe o *software* mas também recorrem a funções do próprio dispositivo, *e.g.* fotografias (é possível saber o ângulo de inclinação da superfície) e o *Global Positioning System* (GPS), para além de permitirem a delimitação manual da superfície ou a área em análise, com o intuito de melhorar a precisão e rigor dos dados a serem analisados.

O **Solar Shading**, o **Easy Solar**, o **Sunny Portal** ou o **Onyx Solar**, são alguns exemplos desses aplicativos. Estes apresentam algumas vantagens, como por exemplo, a sua portabilidade, a rapidez de resultados (imediate), o elevado rigor e precisão, ou mesmo o sistema de armazenamento da informação calculada (*i.e.*, os registos são armazenados na nuvem (*cloud*) não ocupando memória no dispositivo). Para além disso, posteriormente, estes sistemas permitem o acesso à informação através de um computador. A principal desvantagem deste tipo de aplicativos é sem dúvida o seu custo (entre 20 a 30 euros mensais).

Capítulo 4 - Procedimentos Metodológicos

4.1 - Modelo solar

Depois de analisado cada um dos modelos disponíveis e ponderando os objectivos propostos nesta dissertação foi escolhido o modelo solar desenvolvido por Fu e Rich (1999) (Capítulo 3 - o **Solar Analyst**. Actualmente inserido na *ArcToolbox Spatial Analyst Tools* do *software* ESRI, *ArcGIS* 10.2. Este modelo é um dos produtos mais utilizados no domínio dos SIG, com a designação de **Solar Radiation**.

A base algorítmica do *Solar Analyst / Solar* é o *Hemispherical Viewshed Algorithm* (algoritmo para o cálculo rápido da insolação) também desenvolvido por Fu e Rich. Este algoritmo permite calcular rapidamente a irradiação solar com base em três componentes (Figura 4.1).

- O **Viewshed**, distribuição angular da obstrução do céu que calcula para cada célula do modelo o máximo de obstruções existentes em cada direcção. É uma fotografia hemisférica tirada de baixo para cima (*upward-looking*) semelhante à vista obtida através do olho de um peixe (*fisheye*).
- O **Sunmap**, que determina a quantidade de radiação solar directa proveniente de cada direcção do céu, criando um mapa solar do hemisfério repartido em sectores que representam as horas, os dias e os meses ao longo do ano.
- O **Skymap**, que considera a radiação directa e a radiação solar difusa que é obtida em qualquer direcção do céu. A sua construção é feita a partir da divisão do céu em sectores que são definidos pelas divisões do zénite e azimute.

Através da sobreposição do *Skymap*, *Sunmap* e *Viewshed* é possível calcular a radiação solar directa, difusa e global da área em estudo. Para o cálculo da **radiação solar directa**, o **Viewshed** e o **Sunmap** são sobrepostos, permitindo obter o valor de radiação para cada sector do *Sunmap* que não se encontra obstruído, já no caso da **radiação solar difusa**, é necessário sobrepor o **Viewshed** com o **Skymap** (Fu & Rich, 1999) (Figura 4.2).

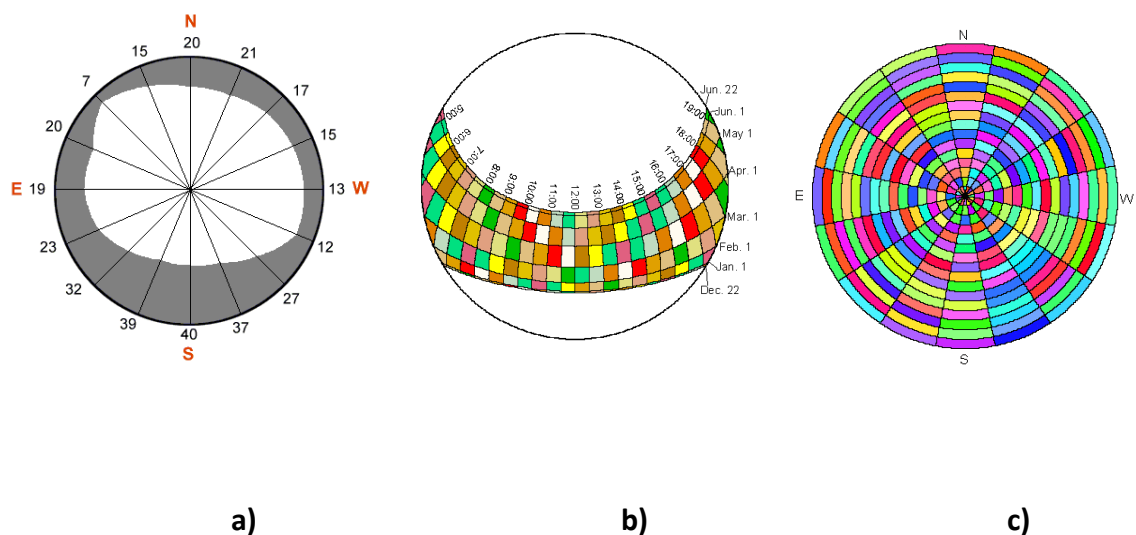


Figura 4.1 - Componentes da radiação solar: a) Viewshed; b) Sunmap ; c) Skymap (Fu & Rich ,1999)

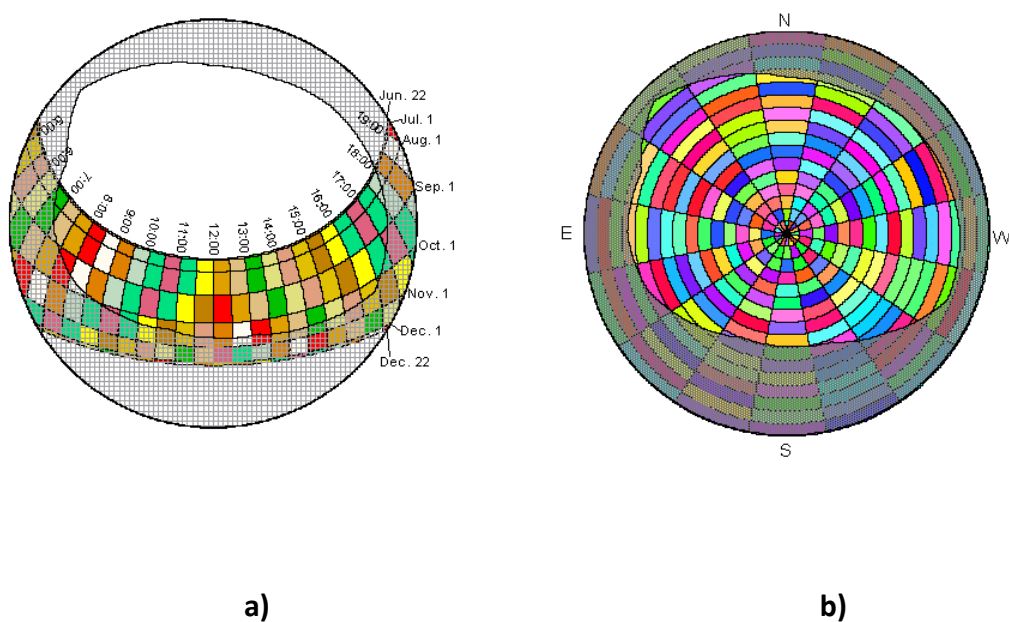


Figura 4.2 - Resultado da parametrização solar: a) Sobreposição do Viewshed com Sunmap (Radiação Directa); b) Sobreposição do Viewshed com o Skymap (Radiação Difusa) (Fu & Rich , 1999)

De acordo com Fu e Rich (1999; 2000b) a radiação solar directa do modelo é determinada para todo o sector do *Skymap* que não está obstruído pelo *Viewshed*, com base na fracção de abertura; na posição solar; na atenuação atmosférica e na orientação da superfície, sendo calculada com recurso a um modelo simples de transmissão de radiação (Monteith & Unsworth, 1990), que recorre a uma constante solar e a efeitos atmosféricos

com base na transmissividade e profundidade das massas de ar. Assim o cálculo do total de insolação directa $\left(Dir_{tot}\right)$ é dado pelo somatório da radiação directa $\left(Dir_{\theta,a}\right)$ proveniente de todos os sectores do mapa solar (*Sunmap*):

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta,a} \quad (4.1)$$

A insolação directa dos sectores do *Sunmap* com o centróide situado no ângulo zenital θ e no ângulo azimutal α é calculada pela seguinte expressão;

$$Dir_{\theta,a} = S_{Const} \cdot \tau^{m(\theta)} \cdot SunDur_{\theta,a} \cdot SunGap_{\theta,a} \cdot \cos\left(AngIn_{\theta,a}\right) \quad (4.2)$$

Em que S_{Const} é o fluxo solar fora da atmosfera na distância média entre o Sol e a terra, conhecido como a constante solar (1338 a 1368 Wm⁻²), τ corresponde à transmissividade da atmosfera no caminho mais curto, $m(\theta)$ é o comprimento do caminho óptico relativo, $SunDur_{\theta,a}$ a duração do tempo representado pelo sector do céu, $SunGap_{\theta,a}$ a fracção de abertura para o sector do *Sunmap* e $AngIn_{\theta,a}$ o ângulo de incidência entre o centróide do sector do céu e o eixo normal da superfície.

O *Solar Analyst /Solar Radiation* permite o cálculo da radiação difusa segundo dois modelos. O modelo difuso uniforme (**Uniform Sky**), por vezes referido como “céu nublado uniforme” onde o fluxo de radiação difusa de entrada é a mesma em todas as direcções do céu. O modelo padrão difuso (**Standart overcast Sky**), onde o fluxo de radiação difusa varia conforme o ângulo zenital. Para ambos os modelos os cálculos são efectuados para cada sector do céu dado pela seguinte expressão.

$$Dif_{\theta,a} = R_{glb} \cdot P_{dif} \cdot Dur \cdot SunGap_{\theta,a} \cdot Weight_{\theta,a} \cdot \left(AngIn_{\theta,a}\right) \quad (4.3)$$

Onde R_{glb} corresponde à radiação global normal, P_{dif} à proporção do fluxo de radiação normal que é difusa, Dur ao intervalo de tempo para análise, $SunGap_{\theta,a}$ à fracção de abertura para cada sector do céu, $Weight_{\theta,a}$ à proporção de radiação difusa num dado sector do céu em relação a todos os sectores e $AngIn_{\theta,a}$ ao ângulo de incidência entre o centróide do sector do céu e a superfície interceptada.

Para o modelo de céu uniforme (**Uniform Sky**) o $Weight_{\theta,a}$ é calculado pela expressão:

$$Weight_{\theta,a} = (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) / Div_{azi} \quad (4.4)$$

E para o modelo de padrão difuso (**Standard overcast Sky**) o $Weight_{\theta,a}$ é calculado pela expressão:

$$Weight_{\theta,a} = (2 \cos \theta_2 + \cos 2\theta_2 - 2 \cos \theta_1 - \cos 2\theta_1) / 4 \cdot Div_{azi} \quad (4.5)$$

Em que $\cos \theta_2 - \cos \theta_1$ é a delimitação dos ângulos do zénite dos sectores do céu e Div_{azi} refere-se ao número de divisões do azimute no *Skymap*.

Assim a radiação solar difusa total (Dif_{tot}) é obtida através do somatório da radiação solar difusa ($Dif_{\theta,a}$) a partir de todos os sectores *Skymap*:

$$Dif_{tot} = \sum Dif_{\theta,a} \quad (4.6)$$

Uma vez que a radiação solar reflectida contribui apenas com uma pequena fracção na radiação global (excepto em locais rodeados por superfícies reflectoras) não é incluída na metodologia de cálculo. Assim a radiação solar global total ($Global_{tot}$) é dada pelo somatório da radiação directa e difusa para todos os sectores, este processo é repetido para todas as localizações da área de experimentação produzindo assim um mapa de insolação.

$$Global_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot} \quad (4.7)$$

Assim, e em título de resumo o modelo executa-se de acordo com os seguintes passos:

1. Cálculo da distribuição angular da obstrução do céu (*Viewshed*) com base na topografia;
2. Sobreposição do *Viewshed* com um *Sunmap* para estimar a radiação solar directa;
3. Sobreposição do *Viewshed* com um *Skymap* para estimar a radiação solar difusa;

4. Sobreposição de *Viewshed* com *Sunmap* e com *Skymap* para estimar a radiação solar directa e a radiação solar difusa recebida a partir de cada direcção do céu;
5. Repetição de todos os processos para cada área/ponto a modelar com vista à criação um mapa de irradiação solar.

A compreensão dos procedimentos teóricos que estão na base do *Solar Analyst* / *Solar Radiation* assim com o seu funcionamento, são bastante importantes para a sua posterior calibração e utilização. O modelo tem a sua interface agrupada segundo as particularidades dos diferentes métodos (área, pontos e gráfico), estrutura de dados, efeitos atmosféricos, latitude, elevação, declives, orientações, ângulos solares, efeitos da topografia e consequente sombreamento.

Existem seis conjuntos de parâmetros. O primeiro conjunto de parâmetros são os de entrada (*input*) onde são introduzidos os dados base de elevação através de modelo digital de elevação (MDE). A inserção do MDE é o único parâmetro obrigatório a todos os métodos (área, pontos ou gráfico) e sem o qual é impossível prosseguir na modelação.

O segundo conjunto de parâmetros são os de saída (*output*). O total da radiação global (directa mais difusa) é o output obrigatório a todos os métodos, apenas variando a estrutura de como é apresentado esse resultado. Por exemplo uma representação matricial com os valores em horas por metro quadrado (Wh/m²) para uma superfície de entrada segundo o método em área ou um *Viewshed* com a distribuição angular da obstrução do céu que determina o máximo de obstruções existentes em cada direcção calculado para cada célula do modelo. Também neste conjunto se incluem os *outputs* de radiação directa (*Sunmap*), os de radiação difusa (*Skymap*) e ainda os *outputs* do número de horas de solar, *i.e.*, Insolação.

O terceiro grupo pode ser classificado como o grupo dos parâmetros gerais, onde se inserem o valor de latitude, que deve ser o mais exacto possível, para obter uma calibração aceitável do valor da irradiação solar a superfície a modelar. É também neste conjunto que é possível determinar a resolução/"dimensão do céu" que o modelo vai apresentar nos cálculos de radiação através do valor do *Sky Size*.

O quarto grupo de parâmetros é o grupo dos parâmetros temporais. Onde é possível determinar qual a altura do ano a modelar (*e.g.* Solstícios, Equinócios, apenas um dia ou um

conjunto de dias não sequencial, ou até apenas algumas horas), ou quanto tempo durará essa modelação (cf. secção 4.3.6).

O quinto grupo, o grupo dos parâmetros topográficos permite definir o modo como a informação derivada do MDE (declives e exposições) são introduzidas na modelação.

O sexto grupo diz respeito aos parâmetros de radiação ou atmosféricos onde é possível determinar qual o modelo de difusão a utilizar na modelação (*Uniform Sky* ou *Standard overcast Sky*). Uma vez que o modelo não possibilita a entrada da cobertura de nuvens é possível minimizar essa falha ajustando o valor da proporção do fluxo difuso ou mesmo a fracção de radiação que passa através da atmosfera. A Tabela 4.1 tem o objectivo de elencar e definir todos os parâmetros utilizados pelo modelo independente da geometria utilizada.

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados pelo *Solar Analyst* na modelação solar

(Adaptado da extensão *Solar Radiation*)

Parâmetros	Opções	Definição	Tipo de Parâmetros	Estrutura de Dados	Método
Entrada (Input)	Informação Matricial	Dados de elevação base referentes ao modelo digital de elevação	Obrigatório	Matricial	Área, Pontos e Gráfico
	Ficheiro ou tabela de Pontos	Dados com as localizações específicas dos locais a analisar.	Obrigatório	Pontos e ou Tabela	Pontos e Gráfico
Saída (Output)	Radiação Global	Representação (Matricial) da radiação global ou total de insolação solar (directa + difusa) em horas por metro quadrado (Wh/m ²) para a superfície de entrada.	Obrigatório	Matricial	Área
		Representação da radiação global ou total de insolação solar (directa + difusa) em horas por metro quadrado (Wh/m ²) para cada localização.	Obrigatório	Pontos e ou Tabela	Pontos
		Viewshed raster - Distribuição angular da obstrução do céu que determina o máximo de obstruções existentes em cada direcção calculado para cada célula do modelo. É uma fotografia hemisférica tirada de baixo para cima (<i>upward-looking</i>) semelhante à vista obtida através do olho de um peixe (<i>fish-eye</i>).	Obrigatório	Matricial	Gráfico
	Radiação Directa	Representação (Matricial) da radiação solar directa em horas por metro quadrado (Wh/m ²) para cada célula da superfície de entrada.	Opcional	Matricial	Área
		Representação da radiação solar directa em horas por metro quadrado (Wh/m ²) para localização do ficheiro de entrada.	Opcional	Pontos e ou Tabela	Pontos
		Sunmap - Calcula a quantidade de radiação solar directa proveniente de cada direcção do céu, criando um mapa solar do hemisfério repartido em sectores que representam os dias e os meses ao longo do ano.	Opcional	Matricial	Gráfico
	Radiação Difusa	Representação (Matricial) da radiação solar difusa em horas por metro quadrado (Wh/m ²) para cada célula da superfície de entrada.	Opcional	Matricial	Área
		Representação da radiação solar difusa em horas por metro quadrado (Wh/m ²) para localização do ficheiro de entrada.	Opcional	Pontos e ou Tabela	Pontos
		Skymap - Considera a insolação directa bem como a radiação solar difusa que é obtida em qualquer direcção do céu, a sua construção é feita a partir da divisão do céu em sectores que são definidos pelas divisões do zénite e azimute.	Opcional	Matricial	Gráfico
	Duração	Representação (Matricial) do número de horas de radiação solar directa (Insolação).	Opcional	Matricial	Área
		Representação do número de horas de radiação solar directa (Insolação).	Opcional	Pontos e ou Tabela	Pontos
Gerais	Latitude	O Ângulo de incidência dos raios solares é influenciado pela latitude. A latitude é estabelecida em graus decimais, com valores positivos para o hemisfério norte e valores negativos para o hemisfério sul.	Opcional	Double	Área, Pontos e Gráfico
	Height offset	Altura em metros acima da superfície do MDE (matricial) a qual os cálculos serão realizados, esta compensação será aplicada a todos pontos de entrada.	Opcional	Double	Pontos e Gráfico
	Sky Size	Resolução/ "dimensão do céu" que o <i>Viewshed raster</i> , o <i>Sunmap</i> e o <i>Skymap</i> vão apresentar nos cálculos de radiação.	Opcional	Long	Área, Pontos e Gráfico

Continua

Tabela 4.1 – (continuação) Parâmetros utilizados pelo *Solar Analyst* na modelação solar

(Adaptado da extensão *Solar Radiation*).

Parâmetros	Opções	Definição	Tipo de Parâmetros	Estrutura Dados	Método
Temporais	Anual (<i>Whole year with monthly interval</i>)	São efectuados cálculos de radiação para todo o ano com possibilidade de efectuar saídas gráficas com os resultados mensais caso essa opção seja especificada caso contrário será criada apenas uma saída gráfica com os resultados anuais.	Opcional	Data	Área, Pontos e Gráfico
	Dias especiais (<i>Special days</i>)	Permite calcular os dados de radiação para os dias do solstício de verão e inverno e para os dias dos equinócios.	Opcional	String	Área, Pontos e Gráfico
	Vários dias num ano (<i>Multiple days in a year</i>)	Realiza o cálculo para um conjunto específico de dias dentro de um ano. Basta indicar o ano de início, o dia inicial e o dia final, a configuração padrão inicia-se no dia 5 e termina no dia 160 do calendário juliano, sempre que o dia final for inferior ao dia inicial o dia final é considerado no ano seguinte.	Opcional	Data	Área, Pontos e Gráfico
	Durante um dia (<i>Within a day</i>)	Efectua o cálculo para um único dia. Basta seleccionar o dia corresponde no calendário juliano, introduzir a hora de início e hora de fim. Quando a hora de início e de fim são iguais é calculada a radiação instantânea. Sempre que a hora de início seja antes do nascer o Sol e a hora final seja depois do ocaso do Sol será calculada a radiação diária.	Opcional	Data	Área, Pontos e Gráfico
	Intervalo Diário	Intervalo de tempo (dias) utilizado ao longo do ano para os cálculos para os vários sectores de céu.	Opcional	Long	Área, Pontos e Gráfico
	Intervalo Horário	Intervalo de tempo utilizado durante o dia (horas) para o cálculo dos sectores céu.	Opcional	Double	Área, Pontos e Gráfico
Topográficos	Factor Z	Representa as unidades do terreno x,y numa superfície z	Opcional	Double	Área, Pontos e Gráfico
	Declive e Exposições (<i>input type</i>)	FROM DEM- Declive e Exposições são calculados a partir da superfície matricial de entrada. Todas as pequenas irregularidades do terreno vão ser consideradas. FLAT SURFACE -Tratado como uma superfície plana onde valores contínuos de 0 são utilizados. Tornam a superfície menos sensível a pequenas variações que poderiam originar erros durante a modelação FROM POINTS OR TABLE - Os valores de Declive e Exposições podem ser modelados através de conjunto de coordenadas x e y disponibilizados nos ficheiros de entrada.	Opcional	String	Área, Pontos e Gráfico
	Direcções de Cálculo	Número de direcções azimutais a considerar no cálculo do <i>viewshed</i> .	Opcional	Long	Área, Pontos e Gráfico
Radiação ou atmosféricos	Divisões do Zénite	Número de divisões de céu (<i>sky sectors</i>) a considerar no cálculo do <i>Skymap</i> .	Opcional	Long	Área, Pontos e Gráfico
	Divisões do Azimute	Número de divisões de céu (<i>sky sectors</i>) a considerar no cálculo do <i>Skymap</i> .	Opcional	Long	Área, Pontos e Gráfico
	Modelo de Difusão	Como irá ser considerada a radiação difusa no modelo.	Opcional	String	Área e Pontos
		UNIFORM SKY- Modelo difuso uniforme, onde a radiação difusa de entrada é a mesma em todas as direcções do céu.			
		STANDARD OVERCAST SKY- Modelo de difusão onde o fluxo de radiação varia consoante o ângulo do zénite (Céu nublado).			
	Proporção difusa	Proporção de fluxo de radiação que é difusa. O valor da proporção varia entre 0 e 1, sendo que 0 representa condições atmosféricas de céu limpo.	Opcional	Double	Área e Pontos
	Transmissividade	Fracção de radiação que passa através da atmosfera e varia entre 0 e 1 sendo que 0 representa condições atmosféricas de céu limpo.	Opcional	Double	Área e Pontos

4.2 - Áreas de Estudo

O percurso aparente do Sol deve constituir uma peça fundamental das estratégias para o desenho urbano, dado que a sua relação com a largura das ruas, altura dos edifícios e/ou orientação das fachadas pode impossibilitar a captação de radiação solar invernal (a situação térmica anual mais desfavorável devido à escassez de horas de Sol). Num contexto urbano são muitos os factores a considerar com vista a uma melhoria do aproveitamento da insolação, podendo considerar-se por ordem de prioridade: *i)* orientação das ruas; *ii)* largura das ruas; *iii)* altura dos edifícios; e *iv)* declive do terreno.

Sendo que um dos objectivos desta dissertação é obter o potencial solar em espaço livre urbano, para além de toda a optimização de parâmetros e integração de informação, para que a modelação solar seja mais rigorosa e exacta possível mesmo em ambiente tão complexo como a realidade urbana, é necessário testar os conhecimentos obtidos sobre as relações entre a morfologia urbana e o potencial solar. Esta análise é realizada com o intuito de ajudar a criar e tornar as cidades mais eficientes a nível energético.

Para além de todas as variáveis e parâmetros a ser considerados no modelo propriamente dito (*e.g.* latitude, *SkySize*, declinação solar etc...), quando se modela realidades tão complexas com as das áreas urbanas, para além de todas essas variáveis também devem ser incluídas variáveis relacionadas com o próprio espaço urbano ou morfologia urbana uma vez que estas têm a capacidade de modificar de uma forma substancial o sombreamento urbano. A pergunta que se coloca é qual é então qual a forma urbana que oferece um melhor acesso ao Sol em todas as estações do ano?

Desde o início do século XIX que se procuram respostas para esta questão sobretudo por arquitectos, médicos e sobretudo higienistas. A preocupação e a ênfase da importância da luz solar no planeamento urbano surgem em Inglaterra com um movimento higienista em consequência da Revolução Industrial. Este movimento surge da luta de higienistas, médicos e especialistas em muitos outros campos, que lutavam para que os trabalhadores fossem alojados em condições mais saudáveis, onde a luz solar pudesse penetrar. Assim sendo, surgiram diversos projectos arquitectónicos e ideologias que procuravam oferecer uma melhor exposição à radiação solar.

Uma dessas teorias foi a Teoria da Exposição das Fachadas. A orientação das fachadas varia frequentemente de Este para Sul mas esta teoria defendia especificamente que elas fossem voltadas para Este. Esta orientação trazia a vantagem de aproveitar os primeiros raios solares e beneficiar da brisa matinal. No entanto esta opção não reunia consenso, uma vez que no Verão, em algumas latitudes, a radiação às primeiras horas do dia já é bastante elevada e ao meio dia poderia tornar-se insuportável, criando uma alteração abrupta das temperaturas (arrefecimento/aquecimento) que poderiam ser prejudiciais para a saúde. Assim surgiu uma solução intermédia, aplicada sobretudo aos países localizados a maiores latitudes, onde as fachadas beneficiariam de uma orientação mais aberta de direcção Este-Oeste e para os países do Sul beneficiariam de uma orientação Norte-Sul.

Após se determinar qual a melhor orientação para a disposição das fachadas conclui-se que só a orientação das fachadas não era suficiente para lidar com o problema. Assim surge uma outra teoria, a teoria da Orientação dos eixos de via. Com esta teoria defende-se que a radiação solar é distribuída uniformemente em casas em ruas de orientação Norte-Sul e fachadas viradas a Este-Oeste. Para além desta preocupação com a orientação das fachadas, na orientação dos eixos de via passa-se a ter em conta a largura das ruas, a altura dos edifícios e a sua disposição para que não causem sombreamento. A orientação diagonal das vias passou a ser uma das mais adoptadas, uma vez que permitia resolver o problema da orientação das fachadas e facilita a passagem da radiação solar, uma vez que mimetiza o movimento sazonal do Sol. Esta solução passou a considerar o ângulo da orientação da via com base na posição do Sol e na altura máxima que este atinge ao longo do ano (declinação) podendo fazer um ângulo entre 0° e 45° ou mesmo 60° a 70° dependendo da latitude.

Actualmente, a resposta a esta questão prende-se com a busca de soluções que permitam maximizar o aproveitamento da energia solar. No entanto uma vez que as malhas urbanas são resultante da constante evolução destes ideais, é possível que uma cidade apresente resquícios de mais do que umas das teorias acima referidas, como é caso de Lisboa e em particular cada uma das áreas escolhidas para realizar a modelação. Assim, um dos objectivos deste trabalho é detectar a influência das malhas existentes no que se refere às suas potencialidades de aproveitamento solar e contribuir para novas teorias que permitam que o espaço livre seja dotado de maior capacidade de aproveitamento solar.

Para este fim, é necessário ter em conta a tipologia edificatória, a morfologia dos quarteirões (se incorporam espaços verdes ou apenas edificado), onde se localizam os espaços públicos e como se desenvolveu a rede viária uma vez que estes factores influenciam de uma forma muito directa a “acessibilidade solar”. Então, para que os edifícios e fachadas possam garantir o número de horas adequados, para que a sua eficiência energética seja a máxima ou para que os espaços abertos consigam atingir o máximo de iluminação natural, apenas uma boa orientação da malha urbana não é suficiente.

A malha urbana condiciona as relações entre vias, edificado e espaços abertos uma vez que a distancia, disposição e altura dos edifícios podem reduzir a quantidade de céu visível e como consequência da quantidade de energia recebida. Foram então escolhidas quatro áreas de estudo (Figura 4.3) que correspondem a diferentes tipos de morfologia urbana (malha urbana), a ver: *i)* Alta de Lisboa; *ii)* Parque das Nações; *iii)* Bairro Madre Deus; e *iv)* Baixa de Lisboa.

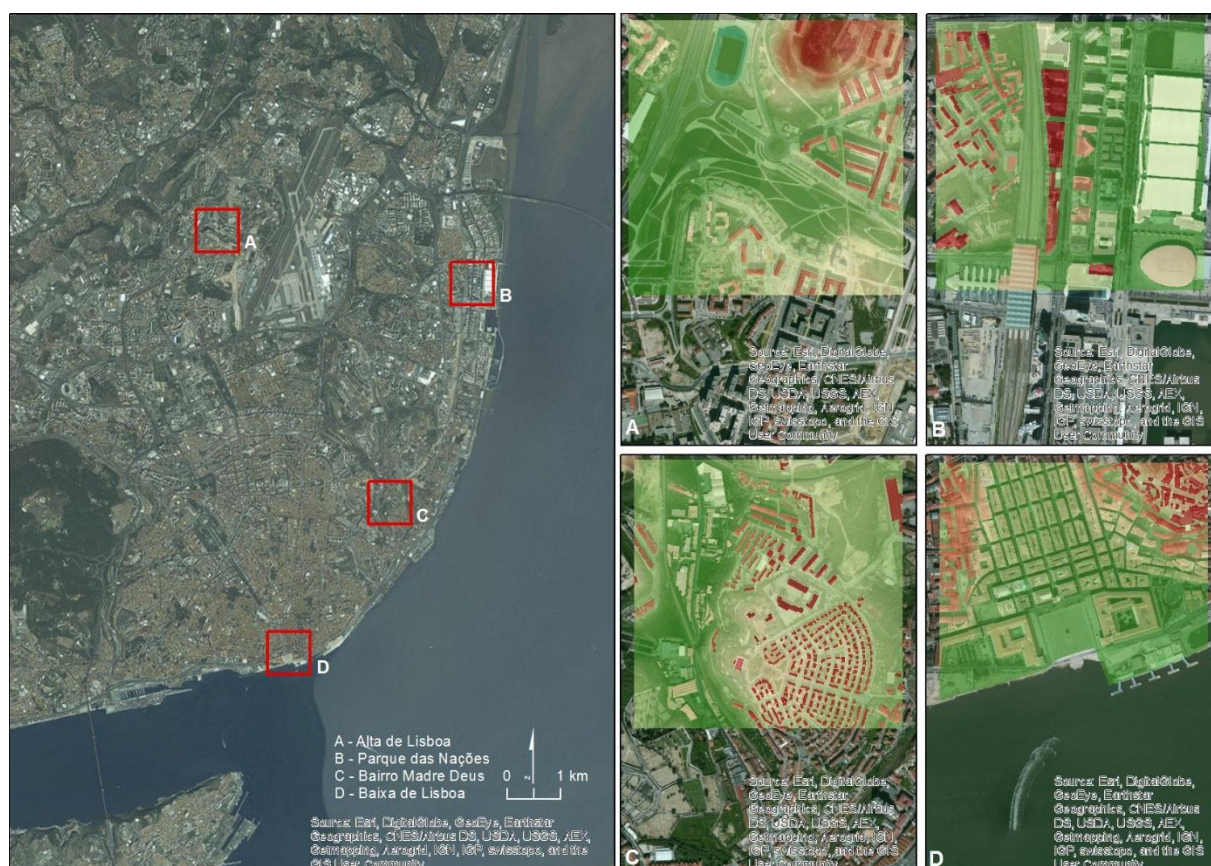


Figura 4.3 - Delimitação das áreas de estudo

A morfologia urbana permite saber como a cidade é organizada internamente e como evoluiu. Lisboa é uma cidade heterogénea do ponto de vista morfológico onde se encontram

diversos tipos de traçados que traduzem o modo e a época em que se construíram (Salgueiro,2001). Pode-se assim considerar um núcleo antigo (malhas relativamente irregulares) e um tecido urbano de malhas ortogonais

O **núcleo antigo** correspondente à parte mais velha da cidade, Alfama, colina do Castelo e, parcialmente, às freguesias da Graça e Santana, que apresentam **malhas relativamente irregulares** resultantes da combinação entre antiguidade da ocupação (influência muçulmana) e a topografia.

As **Malhas ortogonais** são fruto de urbanizações planeadas, com tramas diferentes consoante a época em que foram edificadas. No século XVI, construiu-se o Bairro Alto, a primeira urbanização de traçado regular na cidade que veria crescer significativamente a altura dos edifícios com o processo de densificação dos séculos seguintes. Na segunda metade do século XVIII a reconstrução da parte baixa da cidade, na sequência do terramoto, adoptaria uma malha ortogonal hierárquica alongada no sentido Norte-Sul e rematada por praças quadrangulares e onde se situa a área de estudo denominada Baixa de Lisboa.

Se atentarmos à realidade de Lisboa verificamos que existe uma preferência generalizada para a ocupação de locais dominantes sobre a paisagem, que Orlando Ribeiro caracterizou como uma “atração pelos lugares inexpugnáveis” (Ribeiro, 1994), reflectindo-se na implantação do edificado no alto das colinas, nas encostas e ao longo das cumeeiras. Esta situação vai influenciar directamente a malha urbana, introduzindo deformações à sua génese predominantemente ortogonal e produzindo variações que permitem atribuir diversas particularidades às áreas de estudo escolhidas.

4.2.1 - Alta de Lisboa

A “Alta de Lisboa”, ou, formalmente, a área de intervenção do Plano de Urbanização do Alto do Lumiar (PUAL) constitui um projecto de reordenamento urbano de um vasto território da cidade de Lisboa, onde em tempos idos se misturavam actividades agrícolas, com habitações degradadas, em grande parte de génese ilegal, funcionando como entrave ao desenvolvimento do território, à coesão com a área envolvente consolidada, e à própria coesão da cidade de Lisboa. A Alta de Lisboa constitui o segundo maior projecto urbanístico

planeado e construído de raiz em Portugal, a seguir à Expo 98 (última área de estudo contemplada).

Actualmente a área de estudo encontra-se inserida nas freguesias do Lumiar (30% da área) e Santa Clara (70%). O tecido urbano é variado e complexo, constituído por 270 edifícios com diferentes tipologias, desde blocos de moradias unifamiliares, *i.e.*, edifícios com 1 a 2 pisos (19%) até edifícios de apartamentos por exemplo edifícios com 5 ou mais pisos (71%). Possui também serviços, comércio, equipamentos sociais, desportivos e amplas zonas de lazer que são de extrema importância uma vez que a população presente é de aproximadamente 10182 pessoas das quais 56% na faixa etária compreendida entre os 25 e os 64 anos.

No PUAL a lógica reguladora da edificação nasce de uma forma indirecta, uma vez que o estruturante do plano de urbanização, são as estruturas viárias, a principal e a secundária, que definem a malha base da urbanização. Neste caso temos uma deformação da malha ortogonal por meio da ruptura do traçado, a qual pode ser entendida como uma situação particular, decorrente da presença de obstáculos e da sua consequente integração na configuração do tecido urbano. Porém, estes elementos, por vezes de cariz insólito, sobressaem através das configurações que forçam os traçados que integram a adquirir.

A aparente desagregação do conjunto e a consequente fractura do sistema ortogonal deu origem a elementos urbanos dissonantes, *e.g.* campo desportivo, que se traduziram num conjunto de alterações da configuração da malha e nas relações entre as vias que a compõem.

Na Alta de Lisboa a fractura da malha ortogonal deve-se à presença de uma situação geográfica particular, caracterizada por oscilações da topografia. Estas deformações decorrentes da incompatibilidade da malha com o local de implantação criam duas áreas de ocupação que partilham a mesma matriz morfológica e separadas por uma via principal, estruturante, de orientação NO-SE. A estrutura viária (Figura 4.4 a) é composta por 91 segmentos, variando entre o 1 metro e os 503 metros de comprimento. No total têm-se 7931 metros de vias com uma dimensão média de 87 metros e um desvio padrão de 83 metros o que indica um padrão assimétrico.

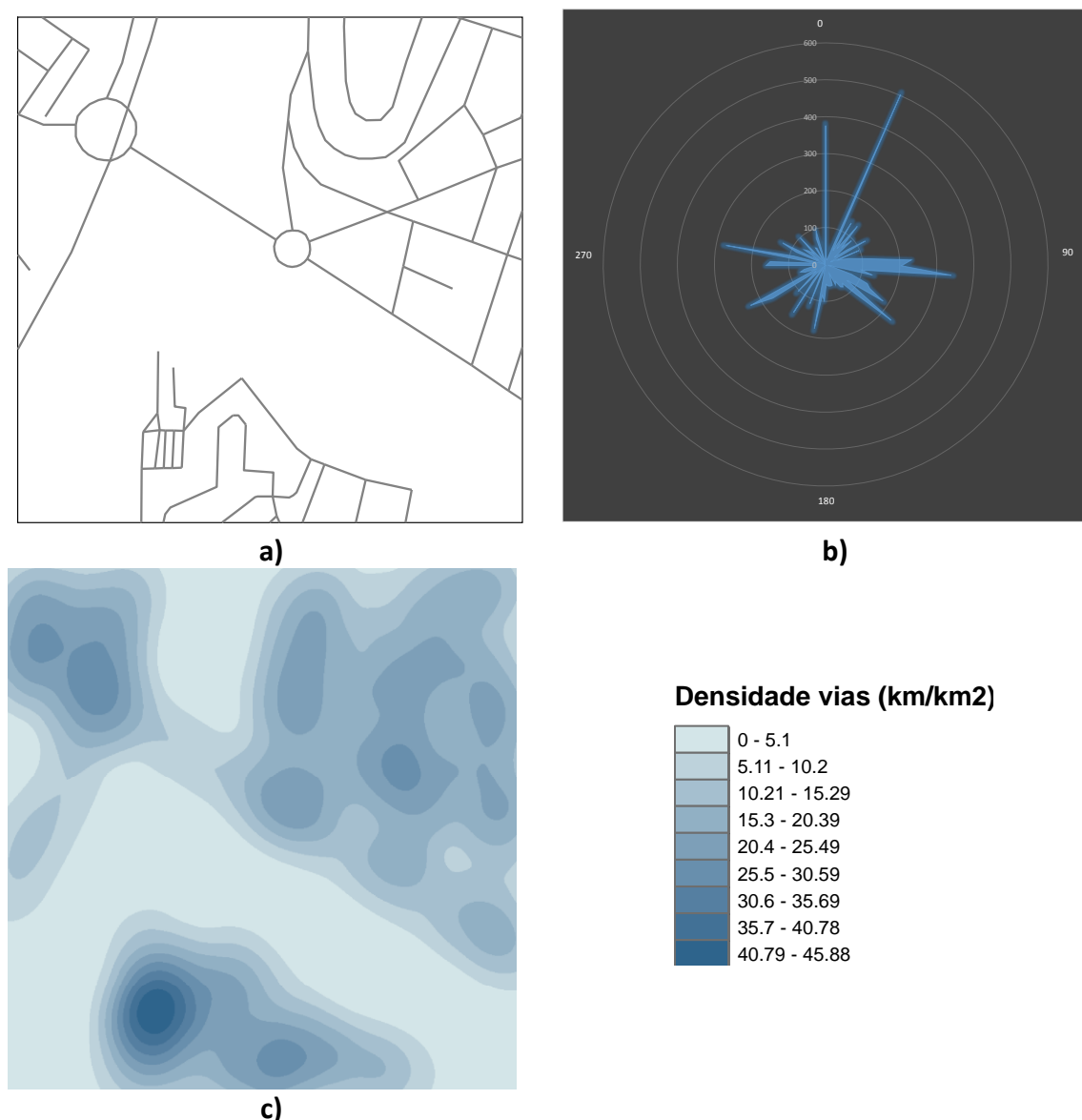


Figura 4.4 - Características da malha urbana da Alta de Lisboa: a) rede viária; b) orientação das vias; e c) densidade de vias

A orientação das vias (Figura 4.4 b) é bastante assimétrica, observando-se uma predominância da direcção Este-Oeste, apesar das vias de maiores dimensões seguirem o azimute Norte-Sul. Em termos de densidade da rede viária (Figura 4.4 c), esta varia entre os 0 e os 45 km/km². Contudo o somatório do valor de todas as células corresponde a 7354489, o valor mais baixo apurado no conjunto das quatro áreas de estudo o que indica uma fraca predominância de áreas com densidade máxima. Este facto é consubstanciado por uma densidade média na ordem dos 11,5 km/km², mais uma vez a mais baixa no âmbito das quatro áreas consideradas. O desvio padrão é de 9 km o que indica uma área relativamente homogénea em termos de densificação.

Esta malha acaba por definir “áreas edificáveis” de grandes dimensões, sobre as quais foi desenvolvida uma rede viária local, ordenando o território por uma malha regular com um módulo de referência de 80x80m, entre eixos de rua, fazendo com que o planeamento desta área seja orientado para a rua complementada com amplas zonas verdes e parques urbanos, privilegiando assim o potencial de radiação solar uma vez que apesar de a área apresentar edifícios de grande altura (5 ou mais pisos) o facto de existir grande espaçamento entre as fachadas dos edifícios e diversas áreas verdes faz com que quase não se verifique nenhum sombreamento dos edifícios sobre a área disponível.

4.2.2 - Parque das Nações

O Parque das Nações é a área mais recente de Lisboa tendo a sua génese associada à operação urbana que decorreu do plano da Exposição Mundial de 1998 (EXPO 98). O traçado urbano teve origem no Plano de Urbanização da Zona da EXPO 98, aprovado em 1994 e coordenado pelo Arquitecto Luís Vassalo Rosa no seio da Parque Expo 98.

Esta área oriental de Lisboa era uma vasta área degrada e poluída, ocupada por instalações industriais antiquadas, depósitos petrolíferos, velhos armazéns militares, um matadouro obsoleto e até uma lixeira a céu aberto, que segundo o plano deveriam dar lugar a um novo conceito de ocupação do espaço que permitisse, no futuro, devolver à cidade de Lisboa uma importante faixa de território de cerca 5 km de extensão, situada à beira do rio Tejo.

Assim, alvo de uma profunda intervenção de regeneração, em particular do ponto de vista ambiental, a EXPO permitiu valorizar todas as singularidades da zona e maximizar as potencialidades de usufruto futuro. Esta operação de requalificação implicou ainda a construção de uma nova rede de acessibilidades, permitindo a conjugação dos vários modos de transporte e das grandes infra-estruturas viárias e ferroviárias (Ponte Vasco da Gama, variante à auto-estrada do Norte, Circular Regional Interior de Lisboa (CRIL), linhas ferroviárias suburbanas, metropolitano, rede viária da cidade), a qual foi potenciada pela construção de uma estação intermodal de transportes, *i.e.*, a Gare do Oriente.

A área em estudo localiza-se actualmente na freguesia do Parque das Nações, onde estão presentes 178 edifícios 78% dos quais com 5 ou mais pisos e residem 5547 pessoas 60% na faixa etária dos 25 aos 64 anos. No que respeita a morfologia urbana esta área apresenta uma malha ortogonal como a Baixa de Lisboa, mas com características distintas.

A malha urbana (Figura 4.5 a) possui 107 segmentos, variando entre o 1,4 metros e os 472,3 metros de comprimento. No total, a área apresenta 9745 metros de vias com uma dimensão média de 91 metros e um desvio padrão de 70 metros, apontando para um certo grau de heterogeneidade.

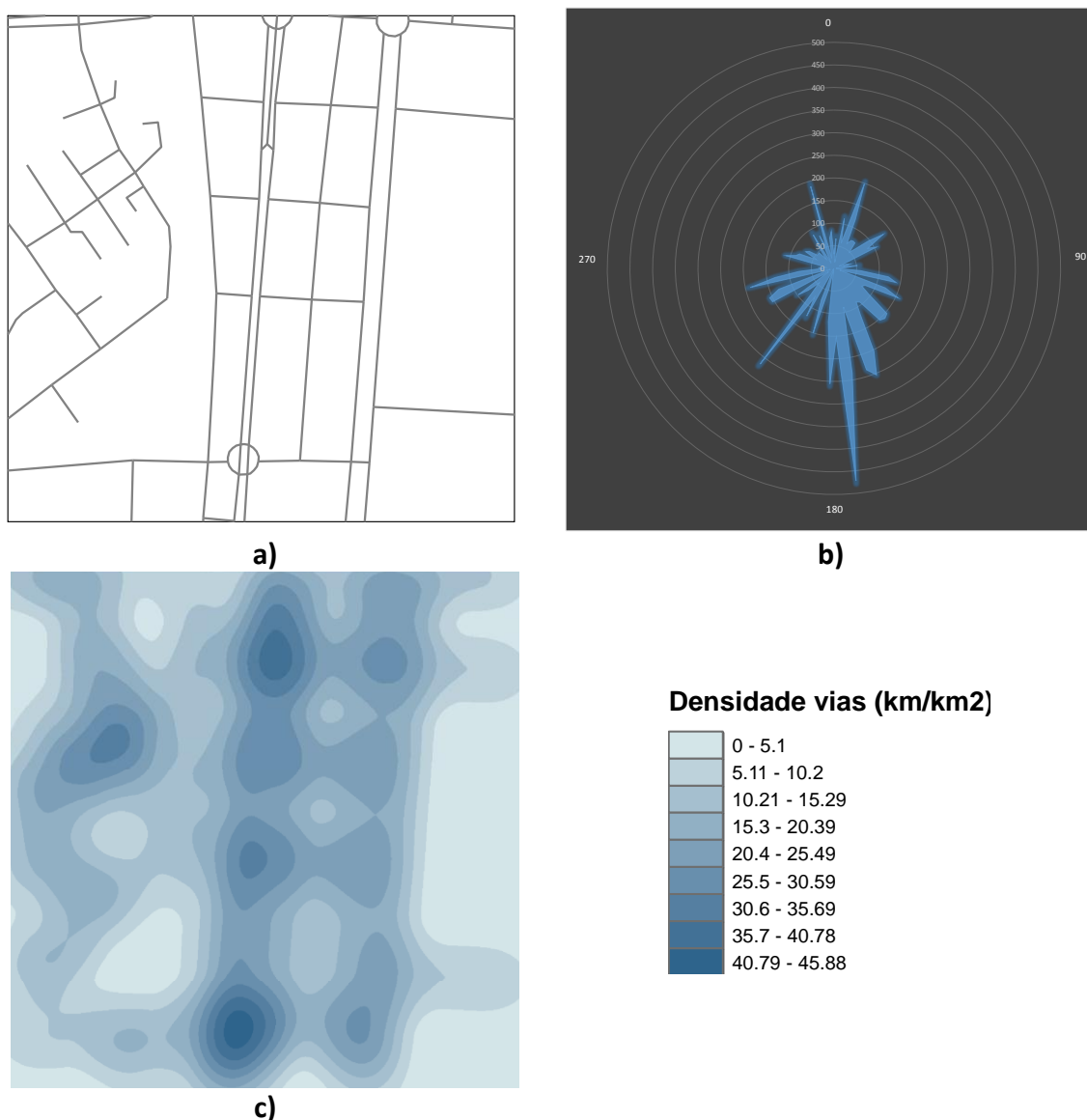


Figura 4.5 - Características da malha urbana do Parque das Nações: a) rede viária; b) orientação das vias; e c) densidade de vias

A orientação das vias (Figura 4.5 b) é bastante variada. Contudo existe uma predominância da direcção Norte-Sul, tanto em termos de frequência como de dimensão. Relativamente à densidade de vias (Figura 4.5 c), esta varia entre os 0 e os 43 km/km². A soma do valor de todas as células corresponde a 9130206, valor semelhante ao apurado para o Bairro Madre deus e indicador de uma malha de densidade média (14,2 km/km²). O desvio padrão é similar ao da Alta de Lisboa (9 km) o que indicia uma malha relativamente homogénea em termos de densificação global.

No caso do Parque das Nações a deformação gera-se por torção da malha devido à concordância de segmentos de via implantados com direcções divergentes que, consequentemente, geram vias sinuosas, com um ou mais pontos de inflexão. Este fenómeno pode ser originado de diversas formas, seja pela curvatura dos eixos estruturantes da malha, seja por convergência das diferentes direcções dos segmentos que constituem o traçado, ou ainda por valoração das direcções de elementos físicos pré-existentes. Qualquer uma destas três situações origina efeitos semelhantes. Nesta área da cidade, a torção revela-se em virtude da tensão latente entre duas direcções ponderadas pelo traçado com igual importância, mais especificamente a frente ribeirinha e o declive moderado da encosta.

4.2.3 - Bairro Madre Deus

A área de estudo seleccionada, com 1,44 km², abrange actualmente três freguesias do município de Lisboa, Marvila, Beato e Penha de França. No entanto aproximadamente 80% da área encontra-se na freguesia do Beato.

Nesta área de estudo estão representados 1287 edifícios distribuídos pelas três freguesias sendo que 89% dos edifícios se encontram na freguesia do Beato, 9 % em Marvila e apenas 2% na freguesia da Penha de França. No que respeita ao tecido urbano, este é distinto do apresentado na Baixa de Lisboa onde predominam edifícios de apartamentos (com mais de 5 pisos). Nesta área existe um predomínio de edifícios de 1 a 2 pisos que representam 68% dos edifícios da área de estudo, *i.e.*, moradias unifamiliares, 19% dos edifícios têm 3 a 4 pisos e apenas 13% têm 5 ou mais pisos. Esta distribuição enquadra-se no contexto de construção deste Bairro da Madre Deus, projectado no Plano Director de

Urbanização de Lisboa de 1938. Este bairro é um dos muitos “bairros económicos” construídos pelo antigo regime composto por um tecido caracteristicamente suburbano de baixa densidade populacional onde 64% do edificado foi construído entre 1919 e 1970 sendo que o período que regista maior número de construções é o período compreendido entre 1946 e 1960 (23%).

No que respeita a caracterização demográfica a área de estudo escolhida contempla 13610 residentes nos quais 53 % têm idades compreendidas entre os 25 e os 64 anos e 23% dizem respeito a indivíduos residentes com idades superiores a 65 anos.

O bairro operário da Madre Deus construído com base na ideia da cidade Jardim, *i.e.*, os espaços verdes tomavam um papel importante neste tipo de conjunto urbano, pois sendo casas económicas o único e verdadeiro lazer dos habitantes seria o ar livre, apresenta uma malha rádio concêntrica ou radial uma vez que as ruas principais confluem num ponto de fuga correspondente ao ponto mais alto e onde se encontra uma praça ajardinada.

A acção do relevo gera um efeito de convergência do traçado quando um traço excepcional, *e.g.* uma linha de festo, é exacerbado no contexto da malha urbana. Os elementos de referência da paisagem, ao agirem como pontos simbólicos na organização do espaço transformam-se em centros de atracção que polarizam o sistema axial. Esta deformação pode ser entendida como um fenómeno ou mesmo como um processo de transformação da malha ortogonal quando, ao eleger o dito centro de atracção, o cume da colina assume simultaneamente uma condição de destaque no território e uma posição de relevo no centro de convergência das vias que compõem a malha urbana. Assim, a influência do contexto, *i.e.*, vizinhança, deforma o próprio modelo transformando-o num sistema radial. Neste Bairro a malha é deforma pelo declive suave das encostas onde este está implantado. Esta malha apresenta ruas radiais que evoluem perpendicularmente ao declive e ruas curvilíneas que mimetizam, por analogia às curvas de nível, a configuração da colina, como que de uma projecção cónica se tratasse. Dentro deste conjunto, destaca-se pela sua preponderância, a praça, situada no ponto mais elevado, numa posição de sobranceira onde convergem os três eixos radiais que estruturam a malha.

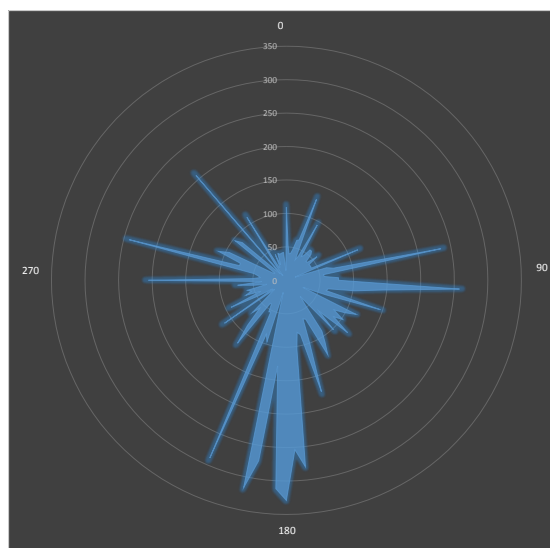
A malha urbana (Figura 4.6 a) é constituída por 124 segmentos, variando entre o 8 metros e os 328 metros de comprimento. No global a área apresenta 10372 metros de vias

com uma dimensão média de 83 metros e um desvio padrão de 68 metros, factor revelador de uma certa homogeneidade.

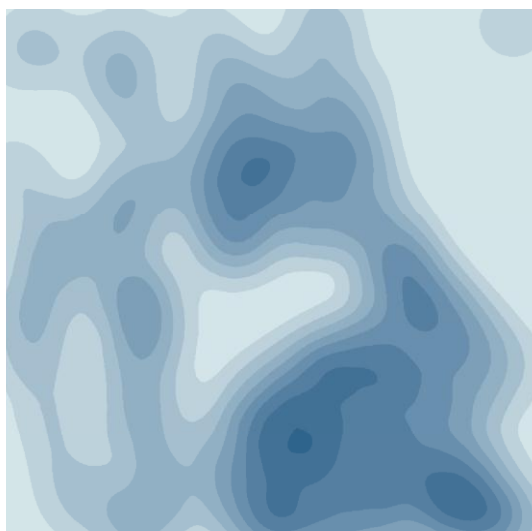
O Azimute das vias (Figura 4.6 b) é extremamente variado. Contudo, em termos de frequência existe uma predominância da direcção Norte-Sul. Quanto à densidade de vias (Figura 4.6 c), esta varia entre os 0 e os 41 km/km², sendo os valores mais baixos no conjunto das áreas analisadas. A soma do valor de todas as células corresponde a 9784928, valor idêntico ao do Parque das Nações e revelador de uma malha de densidade média (15,2 km/km²). O desvio padrão é igual ao do Parque das Nações (9 km).



a)



b)



c)

Densidade vias (km/km²)

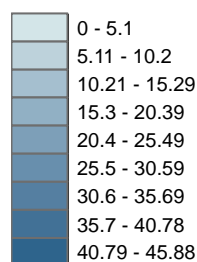


Figura 4.6 - Características da malha urbana do Bairro Madre Deus: a) rede viária; b) orientação das vias; e c) densidade de vias

Esta malha urbana apesar de parecer ajustar-se à deslocação do movimento aparente do Sol ao longo do dia (de Este para Oeste) requer que se tenha em atenção a disposição das fachadas do edificado, *i.e.*, se formam formas côncavas ou convexas. Neste caso a configuração deste bairro forma uma forma convexa onde a rua principal (Rua Dom José de Bragança) tem uma orientação NO-SE fazendo com que nas primeiras horas do dia as fachadas voltadas a Oeste não recebam qualquer radiação, esta configuração faz com que o edificado origine sombreamento diminuído assim ainda mais os valores de radiação recebida. Assim, esta distribuição não parece de todo adequada, uma vez mesmo quando o Sol se encontra a Sul onde a radiação solar é mais intensa também existe sombreamento sobre os eixos viários principais. Assim sendo, os eixos principais apenas recebem a radiação solar quando o Sol já se encontra a um azimute de 140^0 ou 160^0 , no entanto a intensidade da energia é mais baixa quando comparada com o momento em que o Sol se encontra no zénite.

4.2.4 - Baixa de Lisboa

A área de estudo da Baixa de Lisboa, encontra-se inserida na freguesia de Santa Maria Maior, que possui uma área de $3,01 \text{ km}^2$, segundo o estabelecido pela Carta Administrativa Oficial de Portugal de 2015 (CAOP). Esta área de estudo delimitada a Sul pela Avenida Infante Dom Henrique, a Norte pela rua de Santa Justa, a Oeste pela Rua Serpa Pinto sendo que a Este na encosta do Castelo (malha irregular) apresenta uma extensão de $1,44 \text{ km}^2$, *i.e.*, ocupa 48% do total da freguesia.

Nesta área estão contemplados aproximadamente 24% do total dos edifícios existentes na freguesia. Segundo os dados disponibilizados na Base Geográfica de Referenciação de Informação (BGRI) de 2011 construída e disponibilizada pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) 56% dos edifícios representados na área de estudo têm cinco ou mais pisos, 29% têm entre três a quatro pisos e 15% têm entre um e dois pisos. O edificado é na grande maioria (49%) de construção anterior a 1919 ou de construção datada de 1919 a 1945 (30%), distribuindo-se os restantes 20% pelas décadas de construção remanescentes

até 2011. Estes valores, apesar de espectáveis, vêm confirmar a realidade de que esta área de estudo é uma das mais antigas e consolidadas da cidade de Lisboa.

A área escolhida retém 22% (3383 indivíduos) da população residente na freguesia onde 3383 indivíduos 83% se encontram nas faixas etárias entre os 25 e os 64 anos (61%) e superior a 65 anos (22 %).

Analisando a baixa torna-se por demais evidente que os planaltos e os fundos de vale largos (como é o caso) permitem o estabelecimento dos traçados, mas possuem condicionantes naturais com características similares (*e.g.* escarpas e encostas), que constituem um impedimento para a extensão das malhas, principalmente aquelas baseadas em sistemas geométricos regulares.

Esta situação é perfeitamente evidente na Baixa, onde o âmbito geográfico, um fundo de vale como já foi referido, permite que as encostas alberguem uma ocupação urbana que se estende entre a Baixa propriamente dita e as colinas envolventes. Neste espaço, o relevo imprime no traçado urbano os limites que decorrem da natureza do território, tornando evidente a transição entre áreas com características morfológicas diferentes, que se reflectem na variação morfológica da malha urbana de acordo com os declives do terreno.

Assim, se na Baixa a malha ortogonal foi implementada sem dificuldades de maior, já a sua extensão desencadeou uma tensão com o relevo, e particularmente com os limites topográficos, provando deformações quando o prolongamento dos traçados foi viável e descontinuidades quando os obstáculos físicos simplesmente interrompiam as relações entre as partes.

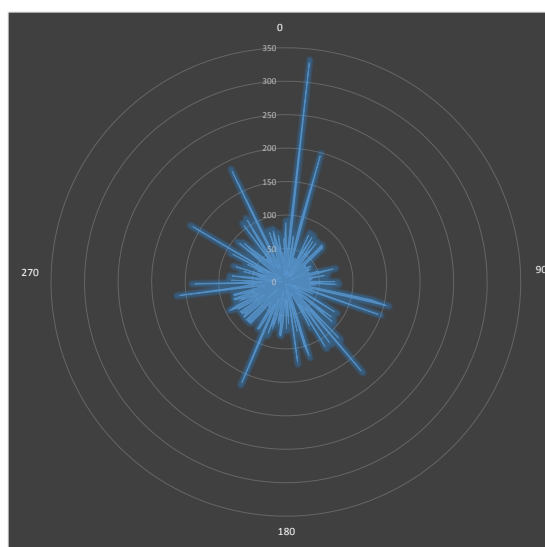
A malha urbana (Figura 4.7 a) é a mais segmentada de todas as áreas de estudo, sendo constituída 237 eixos, que variam entre os 2 metros e os 329 metros de comprimento. A extensão global da rede de vias cifra-se nos 13549 metros, mais uma vez o valor – claramente - mais elevado. A dimensão média é de 57 metros e um desvio padrão de 37, correspondendo a segmentos de comprimento relativamente baixo e constante.

A orientação das vias (Figura 4.7 b) é, de todos os casos analisados, a que apresenta maior dispersão, não havendo uma clara predominância de nenhuma direcção. No entanto, apesar as vias de maiores dimensões manifestam um alinhamento Norte-Sul. Em termos de

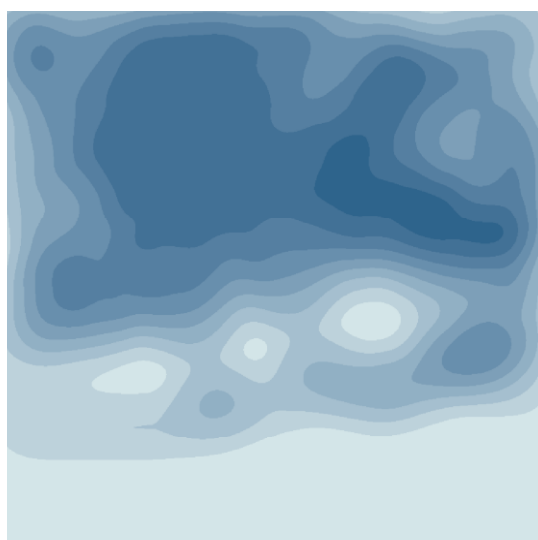
densidade da rede viária (Figura 4.7 c), esta varia entre os 0 e os 44 km/km². Apesar de este valor ser apenas o segundo mais elevado (atrás da Alta de Lisboa) o somatório do valor de todas as células corresponde a 12779588, de longe o valor mais alto apurado no conjunto das quatro áreas, reforçando o estatuto de área com maior densidade de vias. A reforçar esta ideia temos uma densidade média na ordem dos 19 km/km² superior em 5 km à segunda mais alta (Bairro Madre Deus) e um desvio padrão de 14 km/km², o mais alto verificado e que personifica uma área bastante assimétrica. Os valores do desvio padrão encontram razão de ser no facto deste território ser constituído sensivelmente em ¼ pelo Rio Tejo, resultando em duas realidades diametralmente opostas.



a)



b)



c)

Densidade vias (km/km²)

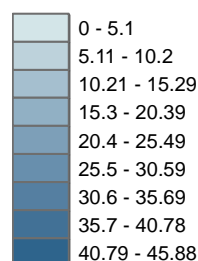


Figura 4.7 - Características da malha urbana da Baixa de Lisboa: a) rede viária; b) orientação das vias; e c) densidade de vias

Estando esta área inserida numa malha ortogonal de orientação Norte-Sul que originam ruas de direcção Norte-Sul gerando edifícios com fachadas orientadas a Este e Oeste nas quais o Sol incide nas primeiras horas do dia e as últimas do dia. Esta disposição faz com que todas as fachadas (com excepção da fachada Norte) disponham de horas de Sol. No entanto, nas horas centrais (12h:30m no caso do solstício de Inverno e nas vertentes voltadas a Sul) nunca é atingido o máximo de radiação. Este tipo de malha gera também ruas de orientação Este-Oeste, originando fachadas voltadas a Norte e Sul. Aparentemente seria uma solução óptima no solstício de Inverno, no entanto, é necessário ter em conta a altura do edificio e a largura da rua pois essa relação vai condicionar a quantidade de radiação recebida sobretudo quando a altura solar é menor, *i.e.*, no Inverno.

4.3 - Calibração do Modelo

Como já mencionado ao longo dos capítulos anteriores o modelo solar adoptado foi o modelo desenvolvido por Fu e Rich (1999). O *Solar Analyst* permite calcular a irradiação solar (WH/m^2) para uma determinada área geográfica e para um determinado período de tempo, levando em consideração os efeitos atmosféricos, a latitude, a elevação, o declive, a orientação, o movimento aparente do Sol e o efeito das sombras projectadas (Santos *et al.*, 2011).

Este modelo, à semelhança da generalidade dos modelos solares, possibilita a análise da radiação solar de duas formas distintas, por pontos ou em área (Tovar-Pescador *et al.*, 2006). No entanto, a particularidade incluir a gráficos (*e.g.* diagramas solares) é também uma mais-valia. Apesar da escolha do **método de radiação solar em área** para levar a cabo esta modelação constituir o foco da calibração, por vezes, e com o intuito de completar as análises, recorreu-se pontualmente ao outro método (pontos) sem que esse facto obrigue a explicitar a calibração dos mesmo, uma vez que os parâmetros são iguais para ambos os métodos sem prejuízo dos resultados.

O *Solar Analyst* sendo um modelo solar, foi concebido para realizar a modelação solar consoante um determinado conjunto de parâmetros. Assim, os seus resultados estão condicionados pela natureza dos parâmetros a calibrar. Essas calibrações são bastante sólidas no que respeita aos parâmetros de latitude, declive, orientação e cobertura temporal

e qualidade das saídas (*outputs*). No que diz respeito aos parâmetros de atenuação atmosféricos embora não inclua a cobertura de nuvens introduz outros dois parâmetros, a transmissividade e a proporção difusa, como forma de equilibrar/minimizar essa falha.

Assim, apesar do número de parâmetros a calibrar (cerca de 14) este modelo apresenta uma estrutura bastante flexível, *i.e.*, permite que o utilizador não necessite de um conhecimento sólido sobre os vastos parâmetros existentes, uma vez que o único parâmetro obrigatório para obter resultados é a introdução de um Modelo Digital de Superfície.

Esta flexibilidade torna o modelo, num “modelo caixa preta”, sendo um dos objectivos desta dissertação testar exaustivamente todos os parâmetros de calibração, mas principalmente os que dizem respeito a resolução do modelo (*Sky Size* e *Direcções*), uma vez que ao longo de toda a revisão bibliográfica apenas são mencionados os resultados do modelo e nunca, ou raramente, se precisam quais os valores utilizados para aferir tal resultado. No fundo a maior parte dos estudos utiliza a calibração pré-estabelecida do modelo. A Tabela 4.2 resume todos os parâmetros calibrados, que ao longo deste capítulo serão decompostos, descritos, explicados e redefinidos caso necessário.

Tabela 4.2 - Parâmetros de entrada para o modelo de radiação solar em área

Configurações	Parâmetros	Descrição	Tipo de Parâmetros	Valor
Entrada (Input)	Informação Matricial	Dados de elevação base referentes ao modelo digital de elevação	Obrigatório	MDS de 1 metro de resolução
Saída (output)	Radiação Directa	Representação (Matricial) da radiação solar directa em horas por metro quadrado (Wh/m2) para cada célula da superfície de entrada.	Opcional	-----
Gerais	Latitude	O Ângulo de incidência dos raios solares é influenciado pela latitude.	Opcional	Input automático a partir do raster
	Resolução <i>Sky Size</i>	Indica a resolução ou seja a "dimensão do céu" que o <i>Viewshed raster</i> , o <i>Sunmap</i> e o <i>Skymap</i> vão apresentar nos cálculos de radiação.	Opcional	4000 X 4000
Temporais	Durante um dia (<i>Within a day</i>)	Efectua o cálculo para um único dia. Basta seleccionar o dia corresponde no calendário juliano.	Opcional	21 de Dezembro
	Intervalo Diário	Intervalo de tempo (dias) utilizado ao longo do ano para os vários sectores de céu.	Opcional	Não aplicável
	Intervalo Horário	Intervalo de tempo durante o dia (horas) utilizados no cálculo dos sectores céu.	Opcional	0,5 h (30 minutos)
Topográficos	Factor Z	Representa as unidades do terreno x,y numa superfície z	Opcional	Não aplicável
	Declive e Exposições <i>input type</i>	Como a informação derivada é inserida na modelação.	Opcional	FLAT SURFACE
	Direcções de Calculo	Número de direcções azimutais a considerar no cálculo do <i>viewshed</i> .	Opcional	360 0
Radiação	Divisões do Zénite	Número de divisões de céu (<i>sky sectors</i>) a considerar no cálculo do <i>Skymap</i> .	Opcional	8
	Divisões do Azimute	Número de divisões de céu (<i>sky sectors</i>) a considerar no cálculo do <i>Skymap</i> .	Opcional	8
	Modelo de Difusão	Como irá ser considerada a radiação difusa no modelo.	Opcional	UNIFORM SKY
	Proporção difusa	Proporção de fluxo de radiação que é difusa.	Opcional	0,0000001
	Transmissividade	Fracção de radiação que passa através da atmosfera.	Opcional	0,5

4.3.1 - Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação (MDE), é o primeiro parâmetro na calibração do modelo, e o único sem o qual não é possível iniciar a modelação. Esta informação pode apresentar-se de duas formas distintas. Por um lado, podemos usar um Modelo Digital de Terreno (MDT) se o modelo apenas incluir informação de elevação de solo a descoberto, *i.e.*, toda a informação referente à elevação de edifícios, vegetação e outras estruturas foi removida. Por outro lado, se o modelo para além da informação de elevação de solo descoberto também incluir informação como o edificado, então considera-se que é um Modelo Digital de Superfície (MDS) (Reis, 1996).

Existem diversos modelos para a representar a informação contida num Modelo Digital de Elevação, sendo os mais comuns a Rede Irregular de Triângulos (*Triangular Irregular Network-TIN*) e o Modelo Matricial. Num TIN, triângulos irregulares dividem a área em análise em faces irregulares sendo o valor do fenómeno atribuído aos nós de cada triângulo. A diferença entre os valores dos nós determina a inclinação da face dos triângulos que são consideradas planas. Os valores, em qualquer ponto dentro da face, podem ser calculados directamente por interpolação (Reis, 1996). O Modelo Matricial, em termos gerais, é conceptualmente mais simples. Este interpreta a área em análise como uma matriz, *i.e.*, forma um conjunto de linhas e colunas espaçadas regularmente, criando uma quadrícula também chamada de malha, grelha (*grid*). Cada quadrícula é composta por uma unidade base, denominada de célula ou píxel, estando a dimensão desta unidade dependente da resolução (quanto menor a sua dimensão maior será a sua resolução). Assim, para cada célula está associado um único valor que define e quantifica uma determinada entidade geográfica (Reis, 1996).

Tal como nos modelos, também nas tecnologias que permitem a aquisição da informação necessária para a criação de Modelo Digital de Elevação existem diversas abordagens. O levantamento de campo, usando ferramentas convencionais, o GPS para aquisição de informação de coordenadas x, y e z, ou a fotogrametria, onde a partir de um procedimento métrico é possível obter informação de um objecto através de medições em pares fotográficos. Mais recentemente, tem-se usado o *Synthetic Aperture Radar Interferometry* (INSAR), técnica desenvolvida através do sinal RADAR no qual permite medir

a topografia de uma superfície bem como as suas mudanças ao longo do tempo. As abordagens baseadas em sistemas de detecção remota activa têm vindo a ser cada vez mais utilizadas, como por exemplo, o sensor de Laser Scanner Aerotransportado, conhecido em inglês pela sigla **ALS** (*Airborne Laser Scanner*). Este sistema assenta na tecnologia *Light Detection and Ranging* (**LiDAR**) (Wehr & Lohr, 1999), uma tecnologia óptica que mede propriedades da luz reflectida de modo a obter nuvens de pontos tridimensionais (*cloudpoints*) que contém diversas informações, como coordenadas (x, y e z), intensidade de reflexão, número do eco (retorno) entre outras.

Os sensores ALS mais recentes, como o Leica ALS 60, permitem a interpretação de até quatro retornos para cada pulsar laser, o que corresponde a um grande detalhe de informação. O sensor tem a capacidade de operar até 200 000 pulsos por segundo, podendo mesmo vir a atingir retornos até 800 000 pontos em cada disparo de laser. Assim, os levantamentos realizados com recurso à tecnologia LiDAR permitem criar um vasto conjunto de pontos na superfície (nuvem de pontos) que contém não só informação tridimensional, mas também informação de intensidade referente, na grande maioria das vezes, ao comprimento de onda na faixa do Infravermelho próximo.

Após o processamento da nuvem de pontos, é possível proceder à extracção de dados cartográficos extremamente precisos (Figura 4.8), como por exemplo, um MDT (representa a superfície real do terreno sem elementos que influenciam na reflectância do píxel) ou mesmo um MDS (representa a superfície terrestre acrescida de quaisquer objectos existentes sobre ela e que interferem no valor da reflectância do píxel, a superfície representada será então o topo destes elementos) (Li, Zhu & Gold, 2005).

O nível de exactidão/precisão de um MDT ou de um MDS depende da escala de aquisição da informação bem como da precisão dos dados topográficos utilizados. Assim, para o cálculo da radiação solar incidente foi utilizado um MDS, que resultou da conjugação de diferentes dados base (Tabela 4.3) e possibilitou a criação de um MDS corrigido, permitindo identificar os edifícios com maior probabilidade de influenciar os cálculos, *i.e.*, maior capacidade de intersectar a radiação, alterando a forma como esta incide sobre o espaço livre (público ou privado).

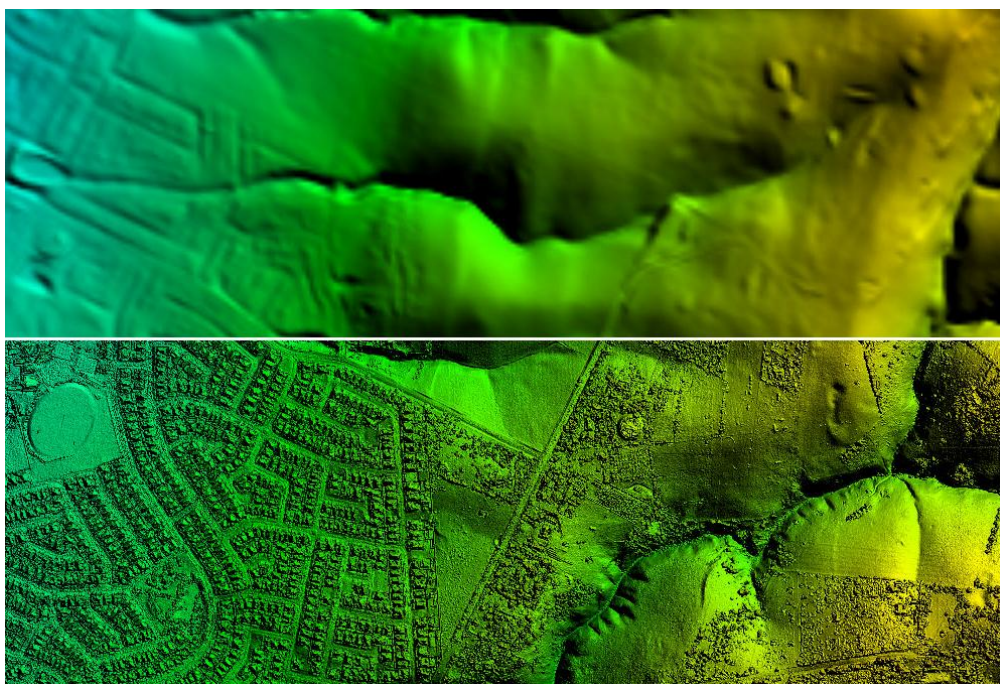


Figura 4.8 - MDT (em cima) *versus* MDS (em baixo)

Tabela 4.3 - Informação base e informação derivada

Dados Base	Estrutura de dados	Escala/Resolução	Fonte	Dados derivados	
Pontos cotados	Pontos (Vectorial)	1: 1000	CML (Câmara Municipal de Lisboa)	Modelo Digital de Terreno (Píxel 1 metro)	Modelo Digital de Superfície (MDS Corrigido)
Curvas de Nível	Linhas (Vectorial)	1: 1000	CML (Câmara Municipal de Lisboa)		
Edificado	Polígono (Vectorial)	1: 1000	CML (Câmara Municipal de Lisboa)	Modelo 3D do Edificado (Píxel 1 metro)	
MDS	Matricial	Píxel 1 metro	LiDAR		

Originalmente o MDS e o MDT são criados em estrutura vectorial, num modelo de pontos e dispostos de forma irregular. Uma vez que a modelação solar se desenvolve a partir de imagens digitais, transformou-se o MDS e o MDT em formato matricial, dispondo os pontos numa matriz (*i.e.*, grelha) regular. O procedimento inicial para a geração desta informação é a interpolação dos valores de altura contidos no MDS e no MDT, com o

propósito de se criar uma matriz bidimensional ou grelha de formato regular, na qual cada píxel formado por um par de coordenadas (x,y) descreve a altura do pulso laser.

Neste estudo, o método de interpolação adoptado foi o do vizinho mais próximo, uma vez que este tem a capacidade de assegurar que o valor interpolado seja um dos valores originais, ao invés de gerar novos valores. A resolução da célula na grelha dos modelos foi de um metro, ficando assim com a mesma resolução espacial do MDT existente para a área à escala 1:1000, obtido por processos fotogramétricos.

O procedimento seguinte consiste na obtenção de uma de uma matriz com as alturas dos elementos existentes à superfície, *i.e.*, a criação do Modelo Digital de Alturas (MDA), obtido a partir da subtracção do MDS pelo MDT. Neste ponto, optou-se por uma abordagem híbrida onde se conjugaram três *layers* de informação para obter o MDS final, uma vez que, a forma dos edifícios obtidos por Lidar ainda está longe de expressar perfeitamente a realidade (Figura 4.9).

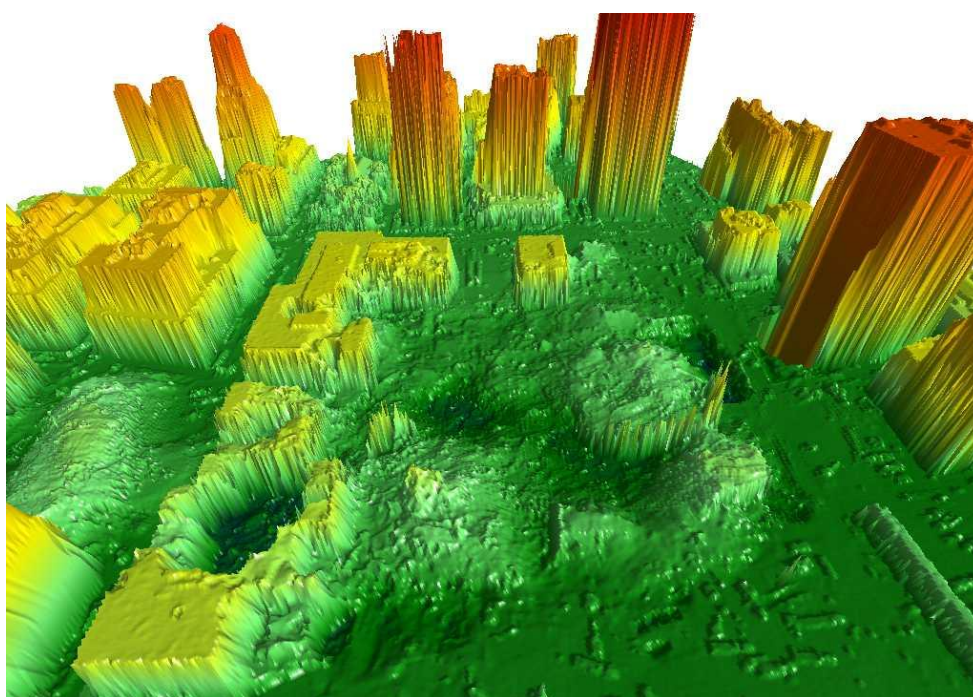


Figura 4.9 - World Trade Center (NASA)

Assim, a partir da informação (Tabela 4.3) vectorial fornecida pela Câmara Municipal de Lisboa (CML) foi gerado o MDT à escala 1:1000. Para a geração do modelo tridimensional (3D) do edificado foi utilizada a base planimétrica da CML à escala 1:1000 (sem qualquer

informação de volumetria, seja em metros ou em número de pisos) com o intuito de obter a forma dos edifícios. Posteriormente foram extraídos dos dados LiDAR, os valores de cota dos telhados das edificações, obtendo-se a morfologia urbana. Toda a informação está sujeita a irregularidades decorrentes do seu processo de execução, pois mesmo informação de alta precisão proveniente de dados LiDAR é passível de apresentar pequenos erros. Assim, a fim de minimizar essas irregularidades, sobretudo na própria diferença de cotas no topo dos edifícios, durante o processo de elaboração do MDA atribui-se a cada edificação o valor máximo de cota encontrado nos dados LiDAR. Por fim, o passo final foi a fusão entre o MDT e o MDA, garantindo que o segundo prevalece sobre o primeiro, segundo a seguinte expressão:

$$MDS = Con(IsNull(MDA), MDT, MDA) \quad (4.8)$$

Estes procedimentos foram repetidos para cada uma das quatro áreas em estudo (Baixa, Alta de Lisboa, Madre Deus e Parque das Nações), e a Figura 4.10 esquematiza todo o processo.

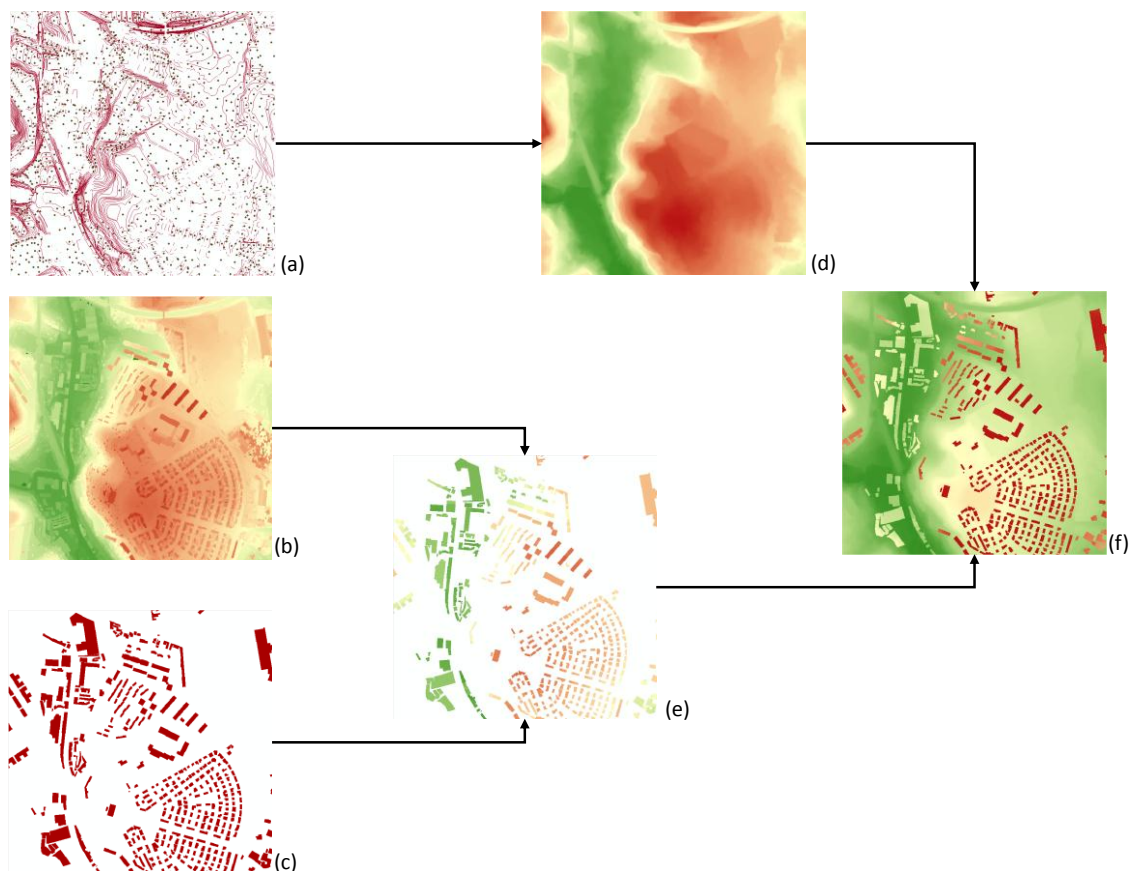


Figura 4.10 - Fluxo de procedimentos para elaboração do MDS: a) base topográfica vetorial; b) dados matriciais LiDAR; c) base planimétrica (edificado) vetorial; d) MDT; e) MDA; f) MDS

4.3.2 - Latitude

A quantidade de radiação solar que atinge um determinado local do planeta depende da latitude a que este se encontra, uma vez que, esta define o modo como os raios solares atingem a superfície terrestre. A radiação solar diminui à medida que nos afastamos do equador e nos aproximamos dos polos, esta situação deve-se sobretudo à inclinação/ ângulo de incidência dos raios solares (que varia devido à forma da Terra), à inclinação do eixo da Terra em relação ao plano da órbita terrestre e ao movimento de translação (movimento de rotação da Terra em torno do Sol). É devido à conjugação destes dois últimos factores que o Sol, no seu movimento anual aparente, nunca ultrapassa os trópicos. Desta forma, nas áreas que ficam para lá das latitudes 23°27' Norte (Trópico de Câncer) e 23°27' Sul (trópico de Capricórnio), os raios solares incidem sempre obliquamente (*cf.* capítulo 2).

É a maior ou menor inclinação dos raios solares (obliquidade) que vai ser responsável pela maior ou menor quantidade de radiação solar recebida (Figura 4.11), uma vez que, quanto maior a obliquidade dos raios solares maior será a “ espessura” de atmosfera que estes têm de atravessar e maior será a superfície sobre a qual estes incidem, amplificando as perdas e dispersão dos raios (Peixoto, 1981).

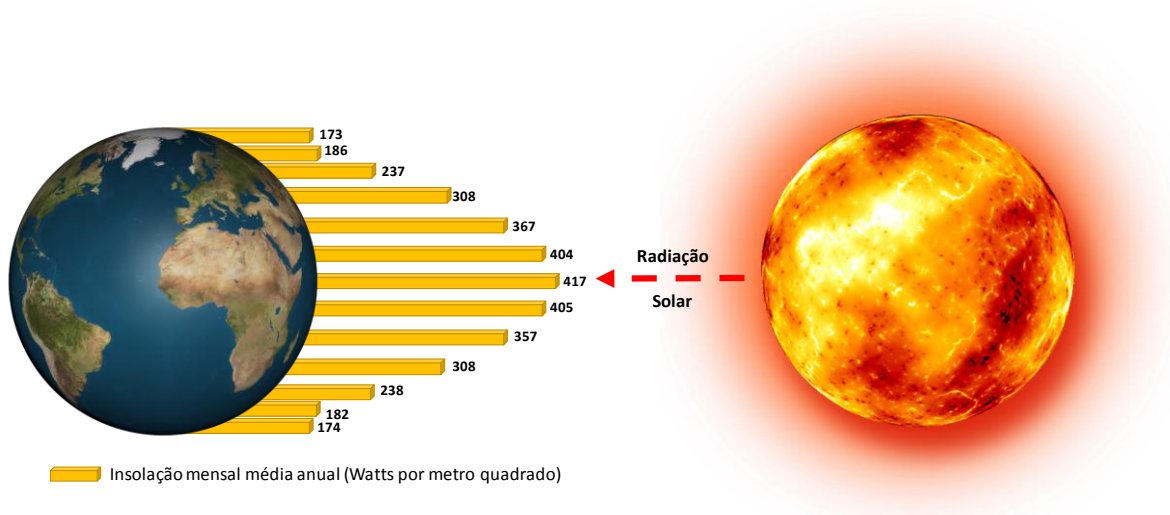


Figura 4.11 - Variação geográfica da intensidade da luz solar com a latitude

(Adaptado de Encyclopædia Britannica, 2012)

O método de radiação solar em área utilizado permite a inserção de um valor de latitude, mas não de longitude. Sendo o *Solar Analyst* concebido para escalas locais, é aceitável usar apenas um valor de latitude para áreas pouco extensas, no entanto para áreas/regiões maiores, aconselha-se a divisão da área de estudo em “subáreas” com diferentes latitudes. Por defeito o *Solar Analyst* define o valor da latitude para 45 graus para fazer a modelação, neste estudo foram utilizados quatro valores de latitude referentes a cada uma das áreas em estudo, conforme demonstra a Tabela 4.4. Esta separação foi efectuada não só devido à extensão das áreas em estudo, mas por questões práticas, uma vez que as áreas não são contíguas. Deste modo, criaram-se quatro MDS através de uma modelação realizada individualmente.

Tabela 4.4 - Dados de Latitude

Área de estudo	Latitude (°N)	Extensão da área de estudo (Km ²)
Alta de Lisboa	38,7800	1,44
Baixa de Lisboa	38,7101	1,44
Madre Deus	38,7340	1,44
Parque das Nações	38,7703	1,44

4.3.3 - Resolução do Modelo

4.3.3.1 - Resolução do céu

O *Sky Size* ou “resolução do céu” estabelece a dimensão do céu para todos os resultados passíveis de extrair do modelo desenvolvido por Fu & Rich, *i.e.*, estabelece a resolução do *Viewshed* (radiação global), *Sunmap* (radiação directa), *Skymap* (radiação difusa) e insolação (número de horas de Sol) (*cf.* secção 4.1). Um dos objectivos desta dissertação é a realização de uma análise individual e detalhada dos parâmetros de calibração, uma vez que, existe ainda um certo desconhecimento da capacidade de resposta do *software* às solicitações do utilizador, sobretudo no que diz respeito a certos parâmetros, nomeadamente o *Sky Size*. A grande maioria dos estudos onde o *Solar Analyst* foi aplicado (*cf.* secção 3.2) manteve o valor predefinido de 200 X 200 do *Sky Size*, chegando por vezes a

uma resolução de 400 X 400. Nos restantes casos não foram mencionados os valores adoptados.

Conceptualmente, o *Sky Size* é como uma matriz concebida por um conjunto de linhas e colunas espaçadas regularmente formando como que uma quadrícula no céu. Apesar de na teoria, quanto maior for a resolução de *Sky size* adoptada mais precisos serão os resultados obtidos, na prática, dada a complexidade do algoritmo e o desconhecimento da capacidade do *software*, foi necessário realizar um conjunto de testes, onde foram aplicadas diversas resoluções, iniciando-se com o valor predefinido de 200 X 200 até ao máximo permitido pelo software de 4000 X 4000. Nesta fase de testes, a partir dos resultados destes cálculos foi possível estabelecer uma primeira relação entre a resolução do modelo e o tempo de processamento (Figura 4.12).

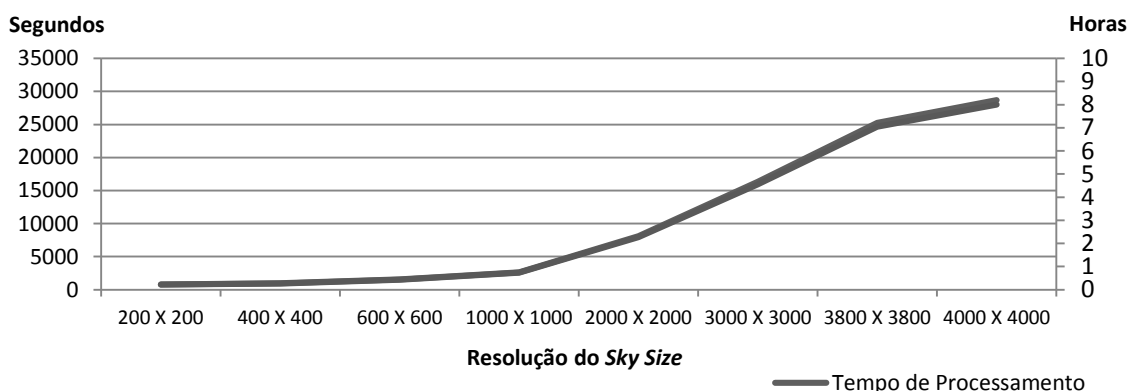


Figura 4.12 - Relação ente o tempo de processamento e a resolução do Sky Size

Para uma área de estudo de 1,44 km² (referente à Alta de Lisboa) os modelos resultaram numa matriz de 1201 linhas x 1201 colunas (pixel de 1 m) calculados em aproximadamente 8 horas (7h58m02seg.) para um modelo de resolução máxima 4000 X 4000 e de aproximadamente 13 minutos, para um modelo de resolução 200 X 200, que se traduz num tempo médio de processamento de 0,02 segundos por píxel. Considerou-se como “aceitável” as quase 8 horas de processamento, definindo-se como resolução máxima os 4000 X 4000, para a elaboração de todo o modelo, uma vez que uma “malha” mais apertada permite o registo de variações (mesmo que subtis) nos valores de radiação, constituindo uma grande vantagem, dentro da complexidade existente, na modelação solar urbana.

4.3.3.2 - Direcções de Cálculo

Estabelecer o valor de 4000 X 4000 de *Sky Size* para a modelação solar não encerra o tema da resolução do modelo, uma vez que existem outros parâmetros importantes a definir, como por exemplo, determinar o número ideal de direcções que o modelo deverá considerar. As Direcções de Cálculo (*Calculation directions*), conforme a revisão da literatura, é outro dos parâmetros importantes até agora pouco investigados. Esta lacuna verifica-se sobretudo no que respeita à sua influência na qualidade dos modelos, já que este parâmetro estabelece o número de direcções azimutais usados na determinação do *Viewshed*. Sendo este um parâmetro opcional, o valor considerado por defeito são 32 direcções, o que segundo Fu e Rich (2000a) é o valor adequado para a modelação de topografia complexa. Para que os valores de direcção sejam considerados válidos estes deverão ser múltiplos de 8 (*i.e.*, 8, 16, 24, 32...). Uma vez que, a influência das direcções continua por explicar, seleccionou-se a Alta de Lisboa como área de ensaio e optou-se por testar diversos valores de direcção, nomeadamente, 16, 32, 256 e 360, para a resolução máxima de *Sky Size*. A Tabela 4.5 resume os resultados do processamento dos modelos calibrados com as diferentes direcções.

Tabela 4.5 - Resultados do tempo de processamento para às diferentes Direcções de Cálculo

Resolução do <i>Sky Size</i>	Direcções de Cálculo (°)	Tempo de Processamento
4000 X 4000	360	7h 58m 02 seg.
4000 X 4000	256	7h 38m 10 seg.
4000 X 4000	32	7h 25m 47 seg.
4000 X 4000	16	7h 21m 37 seg.

Como é demonstrado, a diferença despendida no tempo de cálculo entra a direcção máxima testada 360° e a direcção mínima 16°, é de aproximadamente 37 minutos. Como tal, o modelo que inclui as 360° direcções, foi considerado como o mais adequado. Não deixando de considerar a máxima de que quanto maior a resolução melhor será o resultado final, efectuou-se uma comparação de cada um dos modelos, a fim de aquilatar qual o modelo

(teoricamente) de maior potencial. Esta comparação foi realizada par a par através da expressão:

$$\frac{M_{360}(x1; y1) - M_x(x1; y1)}{M_{360}(x1; y1) + M_x(x1; y1)} \quad (4.9)$$

Em que $M_{360}(x1; y1)$ é o modelo elaborado para as 360º direcções e $M_x(x1; y1)$ o modelo em avaliação.

Como se pode observar na

Figura 4.13 à medida que diminui o valor da direcção, a superfície modelada vai se tornando cada vez mais grosseira, *i.e.*, as transições entre os valores modelados deixam de ser graduais tornando-se cada vez mais abruptos originando bastante “ruído” sobretudo em torno dos edifícios, como é bastante perceptível no modelo de 16 e 32 direcções. No entanto, comparando os modelos de 256 e 360 direcções apenas com recurso a validação visual, não se conseguem identificar quaisquer diferenças.

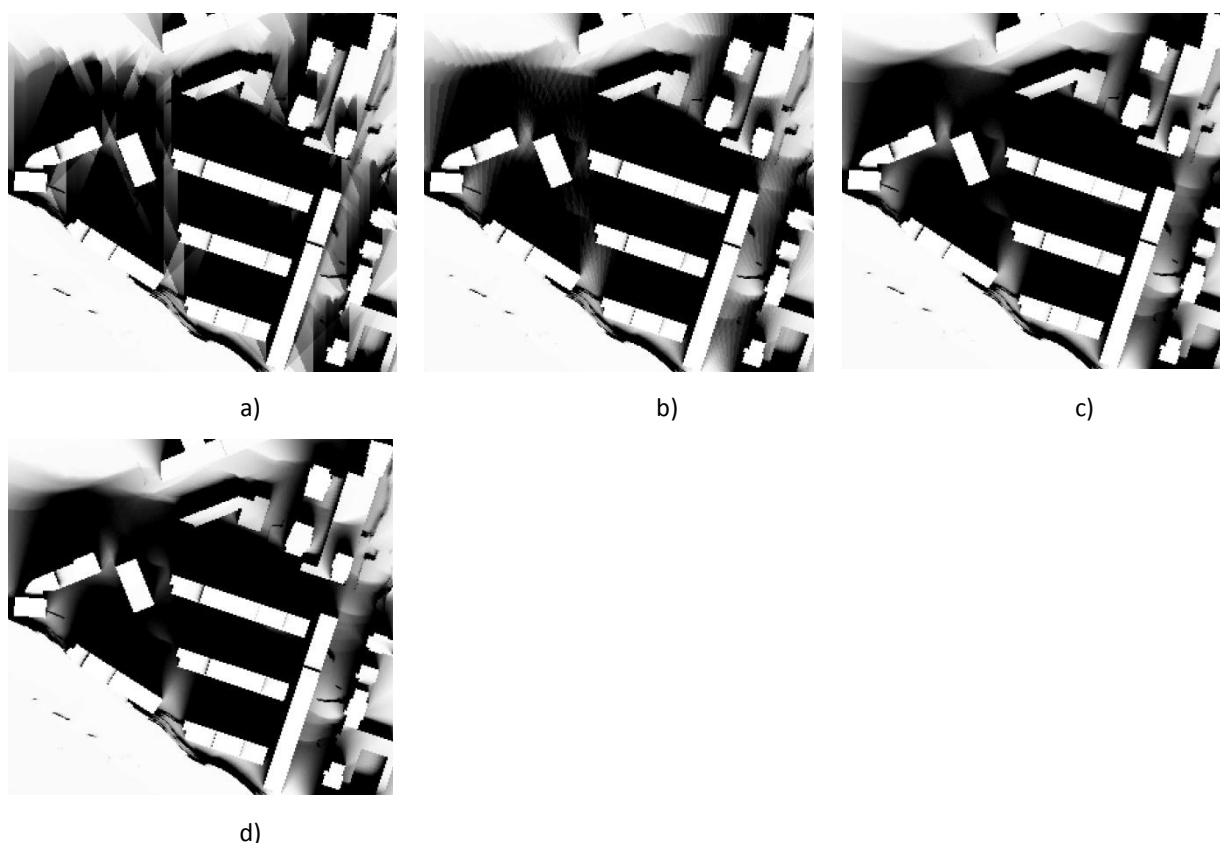


Figura 4.13 - Resultados das diferentes resoluções testadas aplicadas à área teste: a) modelo de 16 direcções; b) 32; c) 256 e d) 360 direcções

Assim, de modo a esclarecer e quantificar tais diferenças foi realizada uma comparação par a par (Figura 4.14) com base na expressão (4.9), acabando por confirmar que os valores mais baixos dão azo a uma subestimação da radiação recebida, principalmente nas áreas em torno dos edifícios.

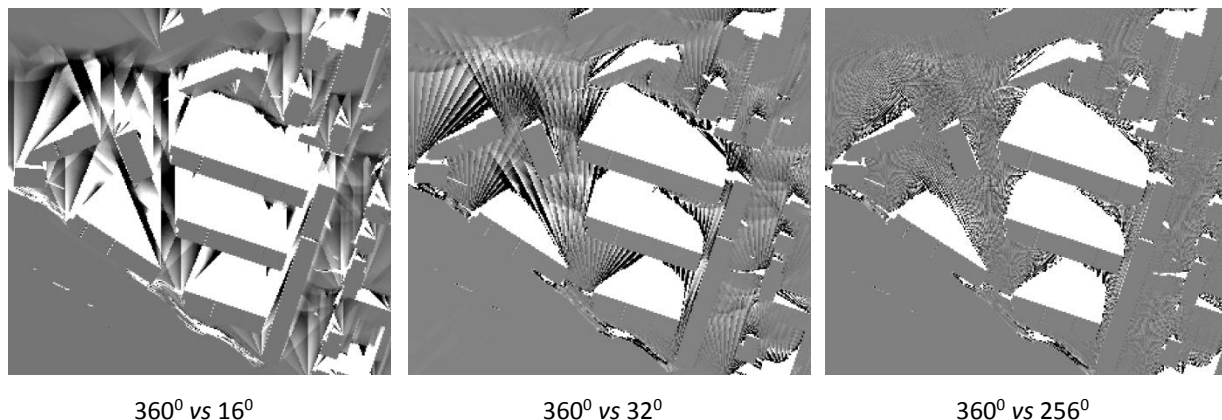


Figura 4.14 - Comparação par a par dos modelos com diferentes direcções

Com base na avaliação feita após a análise dos resultados, conclui-se que o modelo de 32 direcções (valor pré-definido) é, de facto, um modelo que apresenta já um conjunto de resultados satisfatórios. No entanto, avaliando a diferença do tempo de processamento (cerca de 30 minutos) e dos resultados obtidos na utilização de um modelo de 32 direcções com um modelo calibrado para 360 direcções, optou-se por estabelecer as 360 direcções e os 4000 X 4000 de *Sky Size*, como os parâmetros “óptimos” para a resolução do modelo.

4.3.4 - Complexidade do Algoritmo

Um algoritmo pode ser avaliado em termos de eficiência de duas formas: através da sua **eficiência temporal** e com base na **eficiência espacial**. A primeira traduz a velocidade com que o computador processa os dados e a segunda a quantidade de memória que é necessária para executar esse processamento. Na generalidade dos algoritmos a problemática da eficiência espacial não se coloca devido ao facto de virtualmente não

recorrerem a memória auxiliar. Assim, doravante quando for referida a questão da complexidade algorítmica está cingir-se-á exclusivamente à eficiência algorítmica temporal.

Neste contexto, o cerne da questão está em determinar a eficiência temporal do algoritmo, *i.e.*, determinar o seu tempo de processamento. No entanto, o tempo de processamento depende directamente da rapidez do computador/processador. Deste modo, um algoritmo não piora ou melhora só pelo facto de ser executado num processador mais rápido ou mais lento. Efectivamente, continua a ter a mesma eficiência computacional, mas com tempos de processamento diferentes, o que nos leva a concluir que o tempo pode ser uma medida ilusória da eficiência temporal de um algoritmo.

Contudo, assumindo sempre a mesma plataforma de processamento, o tempo pode ser uma variável eficiente para comparar a sensibilidade do algoritmo a diferentes parâmetros de entrada. Assim, o primeiro ponto identifica a operação, *i.e.*, **operação básica**, que deve ser analisada. Nesse caso, mede-se a característica que mais contribui para o custo final de processamento. No algoritmo testado foram identificados dois parâmetros de entrada como sendo os que mais tempo de processamento requerem: a resolução do céu e as direcções de cálculo.

O segundo ponto a considerar é a **dimensão de entrada**, *i.e.*, a dimensão do conjunto de dados de entrada a ter em conta. A análise da complexidade deve contemplar o número de vezes que a operação básica é executada em função da dimensão de entrada. Deste modo, a determinação da eficiência do algoritmo traduz-se numa função de complexidade “cujo argumento de entrada é a dimensão de entrada e cuja saída é o número de vezes que a operação básica é executada” (Rocha, 2014). Esta função serve para comparar a eficiência de diferentes parâmetros para o mesmo algoritmo.

Coexistem duas abordagens para proceder à análise da eficiência de um algoritmo. Uma, a **análise experimental**, corresponde à auscultação da execução efectiva do algoritmo, *e.g.* contabilizando o número de execuções da operação básica face a diferentes dimensões de entrada. Outra, a **análise formal**, deduz uma função de complexidade que deduz o número de execuções da operação básica relativamente a diferentes dimensões de entrada.

Assim, depois de definidos os parâmetros a utilizar relativamente à resolução do céu e às direcções de cálculo é possível aferir a complexidade algorítmica do modelo, visto que

são estes dois parâmetros que detêm a maior quota de responsabilidade na determinação do tempo de processamento.

A Tabela 4.6 apresenta diversas classes de complexidade algorítmica. A classe logarítmica de base dois indicada é a mais comum, mas não passa de uma forma indiferenciada visto que é sempre possível efectuar uma conversão de base, segundo $\log_A x = \log_A B \times \log_B x$.

Tabela 4.6 - Ordens de complexidade Algorítmica (Rocha, 2014)

Ordem	Designação da Complexidade
$O(1)$	Constante
$O(\log_2 n)$	Logarítmica
$O(N^K)$	Polinomial geral
$O(n)$	Linear
$O(n \log_2 n)$	Linear-logarítmica
$O(n^2)$	Quadrática
$O(n^2 \log_2 n^2)$	Quadrática-logarítmica
$O(n^3)$	Cúbica
$O(K^N)$	Exponencial geral
$O(2^n)$	Exponencial
$O(n!)$	Factorial

A classe constante é muito rara e frequentemente apenas ocorre no melhor desempenho de alguns algoritmos. Num contexto mais prático, os algoritmos mais eficientes são os logarítmicos, nos quais o número de operações básicas duplica e triplica quando a dimensão de entrada passa para o quadrado ou para o cubo, respectivamente. Nos algoritmos lineares o número de operações básicas duplica à medida que a dimensão de entrada duplica enquanto nos algoritmos linear-logarítmicos, *i.e.*, pseudolineares, crescem mais rapidamente que os lineares, mas menos que os quadráticos (Figura 4.15).

Os algoritmos polinomiais gerais são menos eficientes que os referidos anteriormente, mas ainda são viáveis. No caso do específico dos algoritmos quadráticos, estes só são exequíveis se a dimensão de entrada se cifrar abaixo das dezenas de milhar. Já os algoritmos exponenciais gerais são insustentáveis e correspondem a algoritmos de pesquisa exaustiva e números recursivos. Na situação particular das classes $O(2^N)$ e $O(3^N)$, o incremento de uma unidade na dimensão de entrada corresponde, respectivamente, ao dobro e ao triplo de operações básicas.

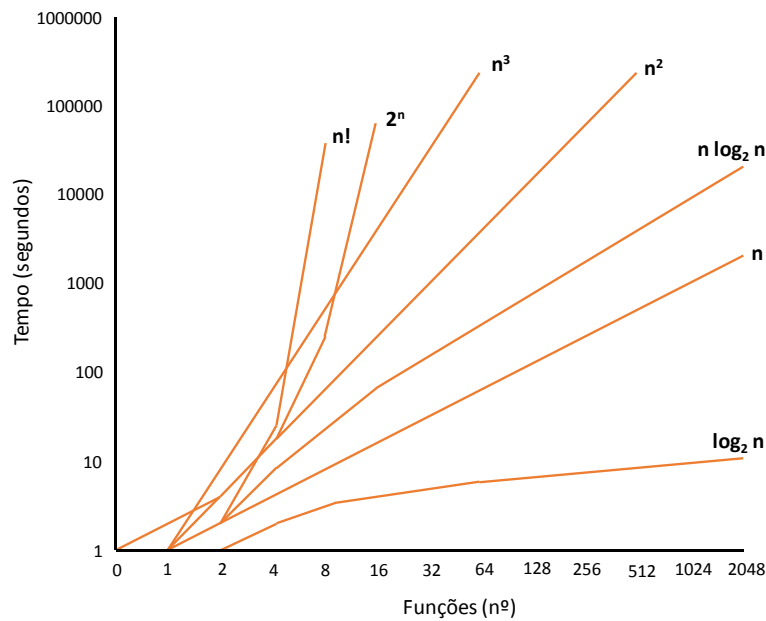


Figura 4.15 - Ritmo de crescimento das funções (Rocha, 2014)

Por fim, os algoritmos menos eficientes são os factoriais. Nestes casos, a um incremento sumativo da dimensão de entrada, *i.e.*, de 1 para 2, 3, 4, 5, ..., n , corresponde uma resposta multiplicativa do número de operações básicas, *i.e.*, $2x$, $3x$, $4x$, $5x$, ..., nx . Notoriamente, esta taxa de crescimento torna este tipo de algoritmos inviável mesmo com uma dimensão de entrada reduzida. Em síntese, deve-se ter presente que os algoritmos exponenciais e factoriais só são exequíveis em tempo útil perante dimensões de entrada diminutas, pelo que o foco se deve centrar nos algoritmos polinomiais ou de complexidade inferior.

A complexidade do algoritmo de cálculo da radiação directa, leva a que por vezes a sua aplicação seja inexecutável. Deste modo, apesar de teoricamente, quanto melhor for a resolução adoptada melhores serão os resultados obtidos, podem ocorrer casos em que o *software* não responde convenientemente às solicitações do utilizador. Assim, o primeiro passo consistiu em correr o algoritmo, mantendo todos os parâmetros fixos, com a excepção de dois: a direcção e a dimensão do céu. Da relação entre a variação dos dois parâmetros e o tempo de processamento (Figura 4.16) resultou que a direcção praticamente não tem influência no tempo de processamento, enquanto o aumento da dimensão do céu o faz aumentar em muito (13min para uma resolução de 200 e 7h58min para uma resolução de

4000). No global podemos considerar o algoritmo como pertencendo à classe de complexidade linear - $O(n)$.

Assumindo os melhores parâmetros de modelação da radiação solar como sendo uma direcção de 360° e uma resolução de céu de 4000 e, tendo uma área de teste de $1,44 \text{ km}^2$, verificou-se que esta demora cerca de 8 horas a ser processada. Como temos uma matriz de 1201 linhas x 1201 colunas (píxel de 1 metro), isto traduz-se num tempo de processamento de 0,02 seg./píxel.

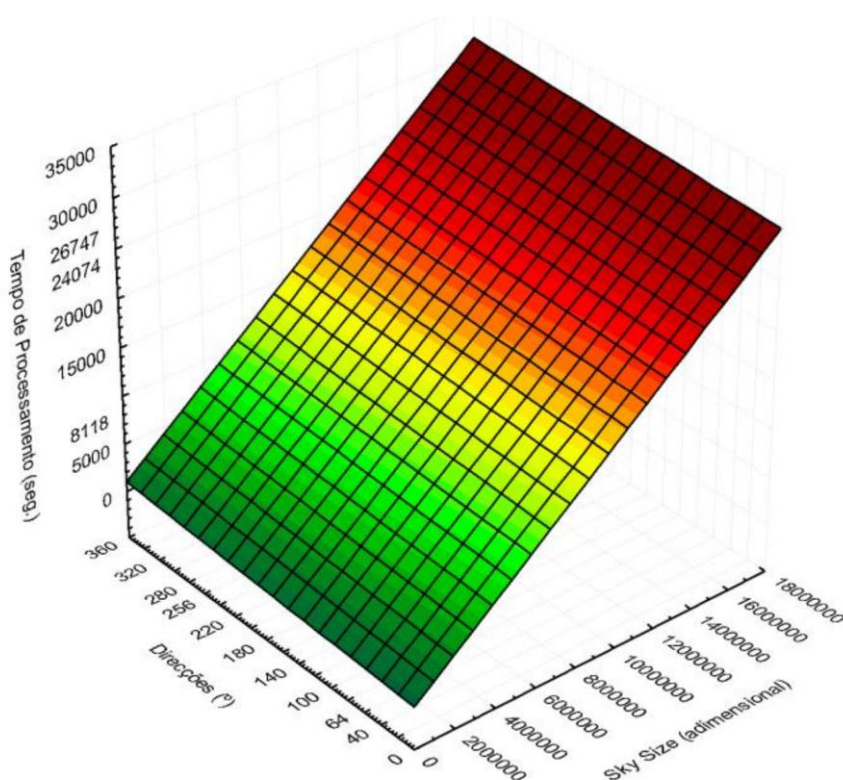


Figura 4.16 - Relação ente o tempo de processamento e os parâmetros de direcção e a dimensão do céu

4.3.5 - Configuração Temporal

O Sol influi directamente no meio ambiente territorial e urbano de diversas formas (Higueras, 2006). O percurso do Sol na abóboda celeste estabelece condicionantes básicos sobre o desenho de qualquer elemento urbano. Os movimentos de rotação e translação da Terra delimitam anualmente situações urbanas mais favoráveis a determinados usos em

detrimento de outros, influenciando desta forma o zonamento de acordo com as condições de radiação solar. Estes factores, também condicionam os desenhos das fachadas dos edifícios e determinam muitos factores da rede de espaços livres e zonas verdes da cidade.

Uma densidade urbana elevada condiciona os valores de radiação solar em espaço público e, portanto, requer estudos detalhados de sombreamento. O estudo dos movimentos do Sol tem como objectivo introduzir estes elementos como factores determinantes no momento de planificar a cidade existente e/ou de propor novas urbanizações. Deste modo, podem-se obter melhores condições de insolação e melhorar a qualidade de vida dos habitantes. Estas estratégias estão directamente relacionadas com o aproveitamento dos recursos renováveis implicando uma redução no gasto energético.

Para além do planeamento mais geral, existem estudos mais pormenorizados que detêm uma importância significativa como a identificação das sombras incidentes sobre os espaços públicos (muito importante em áreas de construção em altura e em especial em zonas de edifícios com mais de 5 pisos). Os métodos gráficos que representam as trajectórias solares são extremamente úteis para os geógrafos, especialmente a carta solar cilíndrica.

4.3.5.1 - Dia a modelar

A altura e a trajectória do Sol vão influenciar a quantidade de radiação solar. Devido à trajectória do Sol, a altura do Sol que não só varia ao longo do ano, mas também durante o dia. Assim o parâmetro chave da geometria solar é a declinação. A declinação é o ângulo formado pelo plano equatorial e a linha que vai do centro da Terra ao centro do disco solar. O ângulo máximo de declinação, $23^{\circ} 27'$ (Trópico de Câncer), no Hemisfério Norte acontece no dia 21 de Junho, que corresponde ao Solstício de Verão e o ângulo mínimo de declinação, $-23^{\circ} 27'$ (Trópico de Capricórnio), no Hemisfério Norte acontece no dia 21 de Dezembro que corresponde ao Solstício de Inverno.

A inclinação do eixo da Terra, relativamente ao plano definido pela Terra e o Sol, origina a que os dias de Verão tenham mais horas de radiação solar e que a altura solar média seja mais elevada nestes meses do que nos de Inverno (Figura 4.17). O percurso da radiação solar na atmosfera é mais curto quando o Sol se encontra perpendicular à superfície terrestre e, portanto, como referido anteriormente, quanto mais longo é o

percurso através da atmosfera, menor será a intensidade com que chega à superfície da Terra, *i.e.*, a intensidade média da radiação solar vai ser menor no Inverno do que no Verão (GREENPRO, 2004).

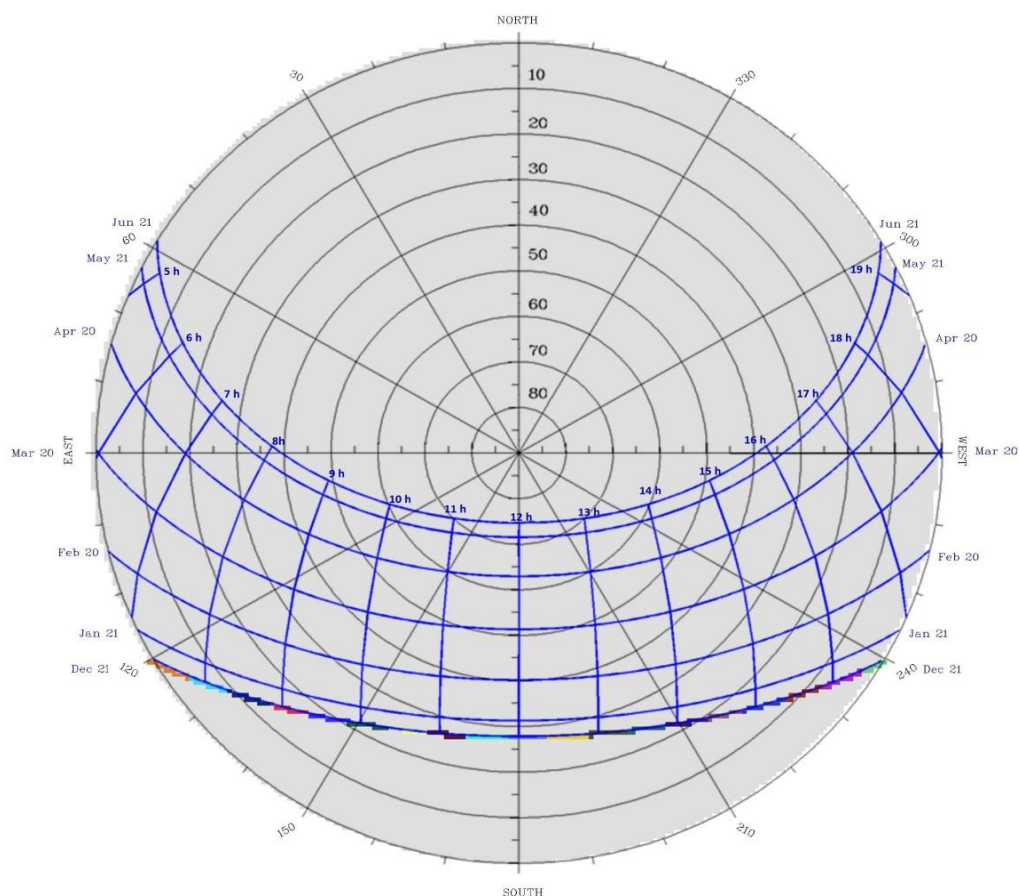


Figura 4.17 - Diagrama solar (*Sunmap*) para a Alta de Lisboa gerado a partir do *Solar Radiation Graphics*

Como o foco desta dissertação recai, quase em exclusivo, no estudo da radiação directa (radiação que incide directamente numa superfície) optou-se por modelar o pior cenário, o dia 21 de Dezembro de 2014, dia do solístico de Inverno. O dia 21 de Dezembro é o dia do ano com menor número de horas de Sol (aproximadamente 9h30m) com o Sol a nascer perto dos 120 graus Este de azimuth¹³ (por volta das 8h), e o seu ocaso a acontecer aos 240 graus Oeste de azimuth (cerca das 17h), como pode ser confirmado pelo diagrama

¹³Azimuth solar- É a distância ao Sol, em graus, a partir do Norte verdadeiro.

solar¹⁴ (*Sunmap*) representado na Figura 4.17, gerado pelo *Solar Radiation Graphics* para a latitude 38,78 graus referente à área de teste (Alta de Lisboa) e posteriormente cruzado e confirmado com os dados disponibilizados pelo observatório Astronómico de Lisboa. O sistema temporal utilizado para a computação da posição geométrica do Sol é baseado no uso do dia Juliano uma vez que permite descrever a posição do Sol conforme o ângulo do dia do ano e da sua variação ao longo do ano.

Efectuando mais um cálculo computacional poder-se-á examinar o percurso aparente do Sol em Lisboa no solstício de Inverno (designado de *Sun Stop*) no dia 21 de Dezembro. Examinando o analema da Figura 4.18 retira-se a declinação solar precisamente para o dia 21 de Dezembro.

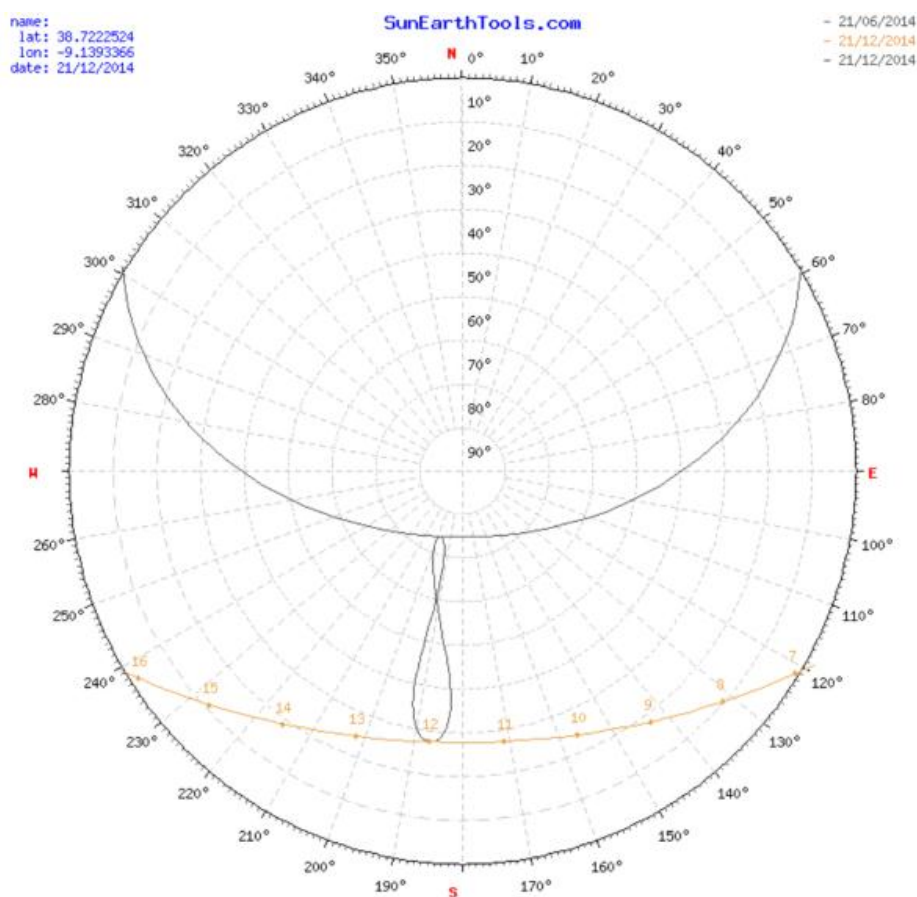


Figura 4.18 - Analema representativo das declinações solares diárias

¹⁴Diagrama Solar- Projecção aparente do Sol no plano horizontal. Contêm, para a mesma latitude, informação referente ao Azimute que varia de 0° a 360°, a altura solar que vai de 0° a 90° e as trajetórias solares aparentes de algum (s) dia (s) do ano ao longo do dia.

Além do azimute solar também é importante avaliar a elevação do Sol, *i.e.*, ângulo zenital. Neste particular, as cartas solares cilíndricas representam o percurso aparente do Sol a uma determinada latitude e são o resultado da projecção do percurso aparente do Sol sobre um cilindro tangente à abóboda celeste. Cada curva representa um percurso mensal entre o máximo registado (solstício de Verão, 21 de Junho) e o mínimo observado (solstício de Inverno, 21 de Dezembro). No eixo das ordenadas encontram-se representados os valores do azimute solar e no das abcissas a elevação solar.

Cada lugar possui uma carta solar cilíndrica própria mediante a sua latitude. Para a latitude de Lisboa (Figura 4.19) comprova-se que, de Inverno, se formam ângulos de elevação máxima inferiores a 35°, enquanto no Verão os ângulos verificados são bastante superiores a 60°.

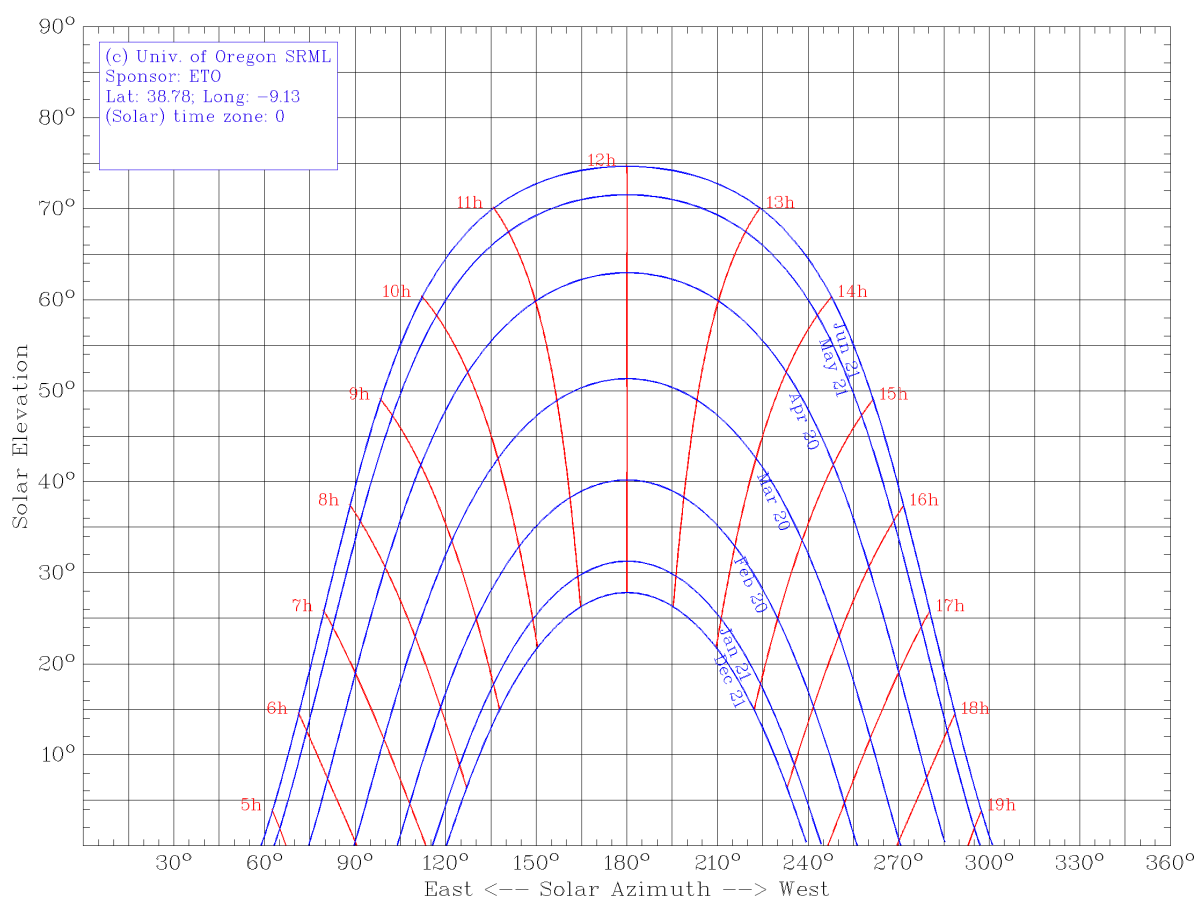


Figura 4.19 - Carta solar cilíndrica de Lisboa

O dia 21 de Dezembro é também o dia do ano onde o ângulo máximo de elevação do Sol é menor, registando um valor máximo de aproximadamente 27° contrastando com os 75° observados no dia 21 Junho (Figura 4.19 e Figura 4.20). Isto significa que, se o Sol se encontra num ângulo mais “baixo”, ou menor, a radiação tem de percorrer uma distância mais longa, sujeitando a radiação solar a uma maior absorção e difusão por parte da atmosfera, e originado um aumento da proporção de radiação solar difusa nos meses de Inverno o que leva a menor intensidade de radiação e a uma maior dimensão das sombras geradas (Figura 4.20).

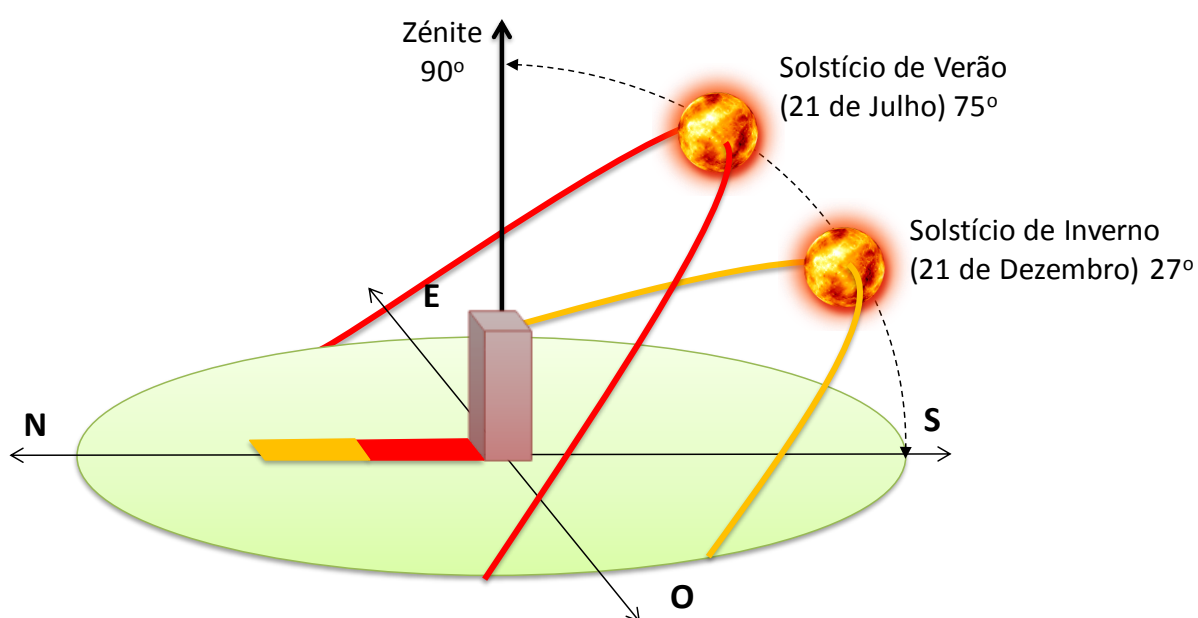


Figura 4.20 - Esquema de Alturas solares de máximas (às 12h solares) de Verão e Inverno para a Alta de Lisboa

É com base nesta explicação que se justifica a escolha do dia 21 de Dezembro para efectuar a modelação. Para introduzir esse parâmetro no modelo foi necessário converter para dias Julianos, uma vez que o *Solar Analyst* utiliza um calendário juliano. No entanto, o modelo permite ao utilizador a conversão automática de qualquer data Juliana, sendo apenas necessário seleccionar o dia no calendário disponibilizado pelo programa. Assim sendo, o dia introduzido na calibração do modelo corresponde ao 355º dia juliano, referente ao dia 21 de Dezembro de 2014 (Figura 4.21).

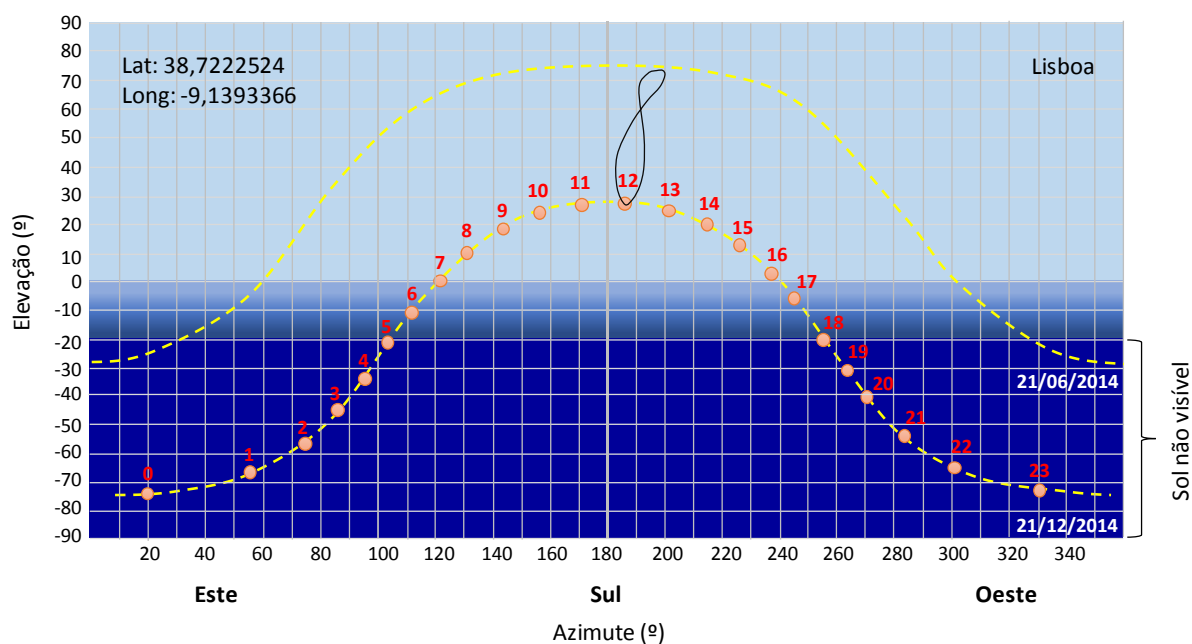


Figura 4.21 - Carta solar cilíndrica de Lisboa juntamente com o analema representativo das declinações solares diárias

4.3.5.2 - Hora inicial e final da modelação

Durante o dia, o ângulo de incidência varia, sendo nulo ao nascer e ao pôr-do-Sol e máximo ao meio-dia local. Levando em conta esta variação, estabeleceu-se as 7h (uma vez que o diagrama solar sugere as 7h30m como o nascer do Sol) como hora de início da modelação, garantindo deste modo, alguma margem de erro, e as 18h como hora final da modelação. O *Solar Analyst* permite que a modelação seja iniciada indicando uma hora de início ou fim, por defeito o *software* estabelece um período de 24 horas para a modelação. Contudo, apesar da indicação das 24 horas, este apenas realiza a modelação para as horas onde existe luz solar, *i.e.*, desde o primeiro momento em que o Sol surge acima do horizonte e até ao último momento onde este permanece acima do horizonte.

4.3.5.3 - Intervalo de tempo

O último parâmetro a definir na configuração temporal é o intervalo tempo no qual será realizada a modelação. O *Solar Analyst* utiliza intervalos de tempo horários (horas) para

efectuar os cálculos dos sectores de céu e encontra-se predefinido com o valor 0,5h, *i.e.*, para efectuar cálculos de 30 em 30 minutos.

Apesar de parecer um valor adequado foram testados vários intervalos de tempo, entre os quais 0,25h (15 min), 0,5h (30 min), 1,5h (90 min) e 3h (180 min) para o modelo com resolução de 4000x4000. A opção de testar diversos intervalos prende-se com a adequação de encontrar um intervalo que concilie um registo rigoroso das variações diárias, mas sem comprometer a velocidade de cálculo e a capacidade de armazenamento da informação gerada, uma vez que cada intervalo de tempo irá originar um *output* individual. Assim, para o dia 21 de Dezembro, com o nascer do Sol a acontecer perto das 8h e o ocaso perto das 17h, resulta num dia com aproximadamente 9h30min, *i.e.*, 19 *outputs* (Figura 4.22).

Após o conjunto de testes, concluiu-se que o valor mais adequado seria o intervalo de tempo de 30 minutos em 30 minutos. Este intervalo permite a recolha com bastante detalhe dos valores de radiação, captando as principais variações da radiação ao longo do dia sem comprometer os resultados referentes à primeira e última horas de modelação, onde as variações de radiação são muito mais “rápidas” do que as registadas ao longo do dia.

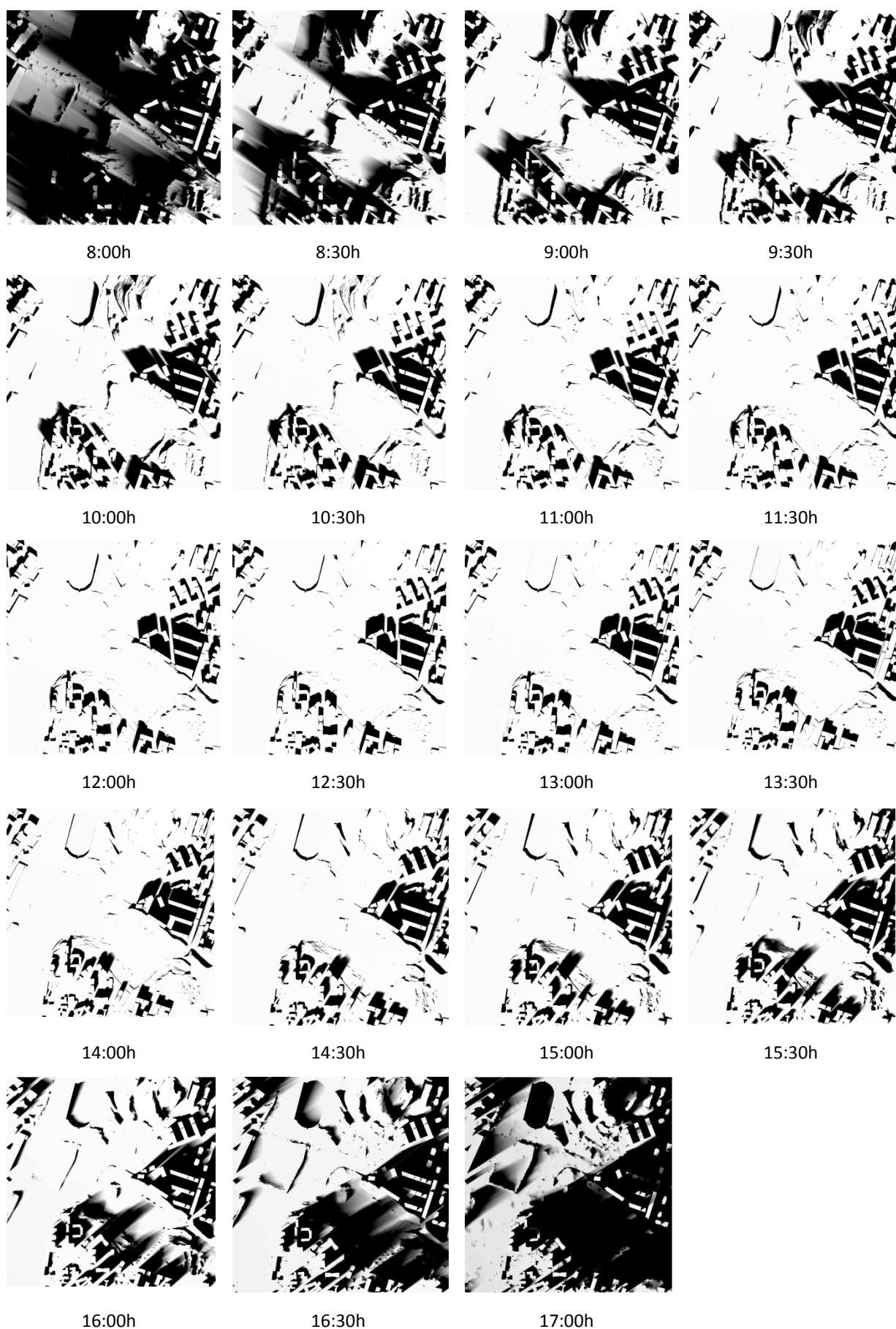


Figura 4.22 - Variação diária da radiação (intervalos de 30 minutos) na Alta de Lisboa

4.3.6 - Declives e Exposições

Embora a latitude, como já foi referido, seja um dos principais factores que influenciam a orientação e a quantidade de radiação, a verdade é que a sua relevância diminui quando a escala de estudo é a nível local. Neste caso, sobressai a topografia como o principal factor responsável pela variação da radiação incidente na superfície.

Em Portugal, durante todo o ano são as vertentes/superfícies orientadas a sul que recebem mais radiação. Assim, para que a integração das tecnologias solares seja bem-sucedida, *i.e.*, para que se possa retirar o máximo proveito dela, é conveniente considerar a informação sobre declives e exposições durante a modelação.

O *Solar Analyst* contempla a integração da informação sobre os declives e exposições na sua modelação. Essa informação derivada pode ser inserida na modelação de duas formas distinta, a primeira, **FROM DEM** (opção predefinida), onde os declives e exposições são calculados a partir da superfície matricial de entrada e onde todas as pequenas irregularidades do terreno vão ser consideradas (Figura 4.23 a). A segunda, **FLAT SURFACE**, trata a superfície como uma superfície plana onde valores contínuos de 0 são utilizados. Esta opção torna a superfície menos “sensível” a pequenas variações, e é susceptível de originar erros durante a modelação (Figura 4.23 b).

Embora do ponto de vista visual a informação derivada da modelação a partir do MDS (Figura 4.23 a) seja mais apelativa, a verdade é que ao se registar todas as pequenas irregularidades da superfície cria-se um “ruído” desnecessário à modelação (visto que os equipamentos de aproveitamento solar ficam sempre um pouco acima do solo), dificultando em alguns casos a própria percepção dos resultados obtidos. Assim, foi estabelecido para toda a modelação que a informação derivada do MDS (declive e exposições) seria modelada segundo a opção **FLAT SURFACE** (Figura 4.23 b).

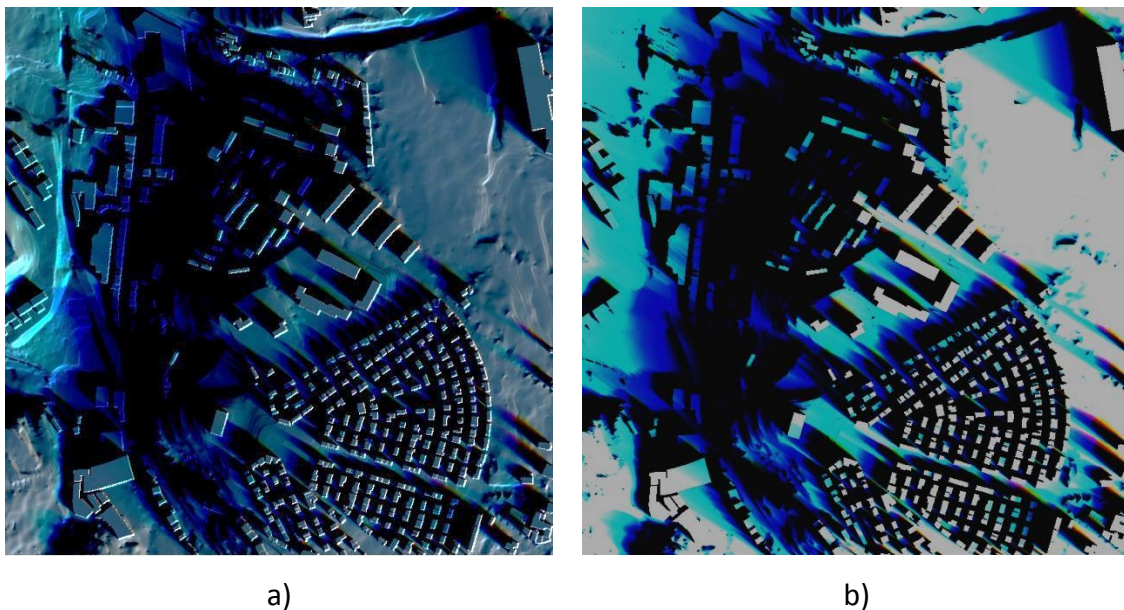


Figura 4.23 - Modelo de radiação: a) *From DEM*; b) *Flat surface*

4.3.7 - Condições Atmosféricas

A maior ou menor obliquidade dos raios solares, a inclinação do eixo da Terra em relação ao Sol (originando que os dias de Verão tenham mais horas de radiação solar que os de Inverno influenciando a altura solar) uma vez que o ângulo solar é menor (menor intensidade de radiação) e a grande obliquidade dos raios solares, fazem aumentar distância que a radiação tem de percorrer, afectando a disponibilidade de radiação solar (aumento da radiação difusa) fazendo-a variar consoante a quantidade de nuvens, vapor de água e aerossóis. Assim, a nebulosidade ou de forma mais genérica o estado do céu vai influenciar a quantidade de energia recebida, *i.e.*, uma maior nebulosidade vai traduzir-se num aumento da radiação difusa e numa redução da radiação directa.

A cobertura de “nuvens” é então uma variável importante na calibração do modelo. No entanto, como já mencionado no capítulo 3, uma das desvantagens do *Solar Analyst* é o facto de este não considerar directamente esta variável. Contudo, o modelo permite introduzir e modificar os valores de **transmissividade** e de **proporção difusa**, possibilitando escolher o **modelo de difusão** a ser considerado na modelação, uma forma de minimizar essa “fraqueza”.

4.3.7.1 - Transmissividade e proporção difusa

A proporção difusa e transmissibilidade têm uma relação inversa. A proporção difusa indica na radiação global normal (radiação directa mais radiação difusa) quanta dessa radiação (proporção) é difusa, por outro lado a transmissividade indica a quantidade de radiação que passa através da atmosfera.

A transmissividade da atmosfera é um parâmetro variável entre 0 e 1, correspondente à fracção de radiação solar que atinge a atravessa a superfície terrestre, em que **0** correspondente à **inexistência de transmissão** e **1** corresponde a uma **transmissão total**, enquanto 0,5 é utilizado para condições normais de céu limpo (sendo também este o valor predefinido pelo programa).

Já no que diz respeito à proporção difusa, os valores variam entre 0 e 1, onde o valor **0,3** é atribuído a **condições normais de céu limpo**. Para obter estes dois parâmetros podem-se, por exemplo, recolher os valores a partir de estações meteorológicas (*SolTerm* 5.1.4¹⁵) (Figura 4.24) ou utilizar os valores predefinidos.

Para a calibração do modelo foi estabelecido um valor de 0,0000001 (muito próximo de 0) para a proporção difusa, uma vez que, é impossível definir um valor de 0. Isto significa que a proporção de radiação difusa no total da radiação global foi reduzida à proporção mínima. No que respeita à transmissão atmosférica utilizou-se o valor predefinido de 0,5, utilizado para condições normais de céu limpo. Estes valores de calibração foram apoiados nos dados do *SolTerm* (Figura 4.24) e nos dados de variação da radiação directa e difusa durante o dia em Lisboa (GREENPRO,2004) onde se pode comprovar que ao longo do ano a irradiação solar global sofre mais variações (mais reduzida nos meses de Inverno) que ao longo do dia, sendo que no mês de Dezembro a componente directa é sempre superior a componente difusa (Figura 4.25).

¹⁵ Programa distribuído pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), é um programa que possibilita a análise de desempenho de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos. Associado a este programa encontra-se um banco de 308 anos meteorológicos de referência.

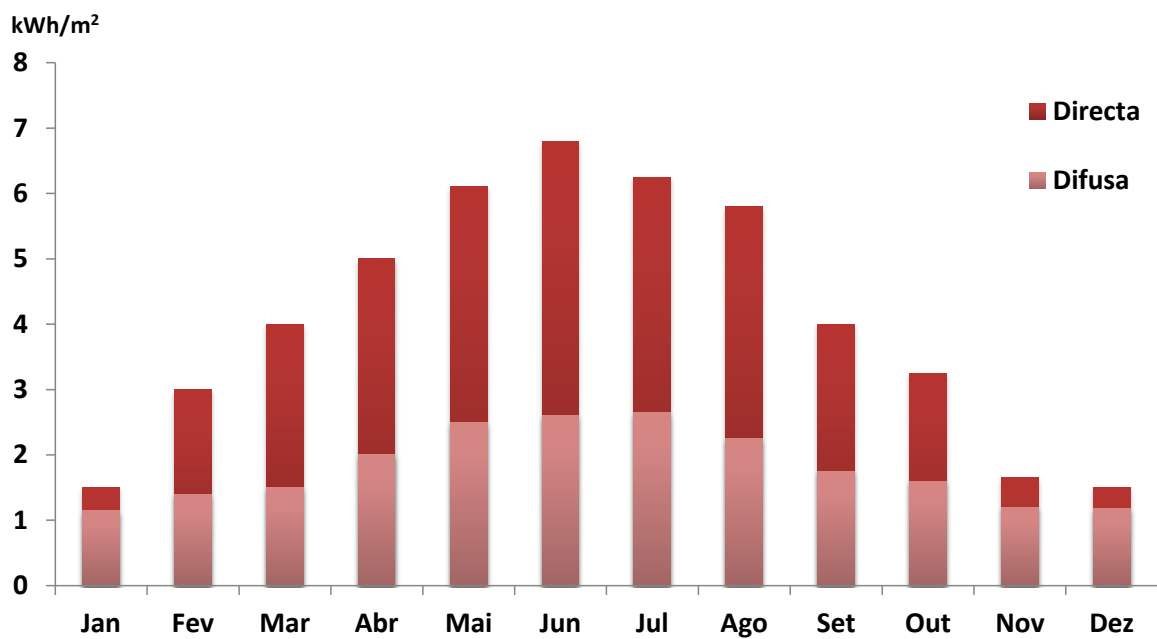


Figura 4.24 - Irradiação solar média diária para Lisboa (SolTerm)

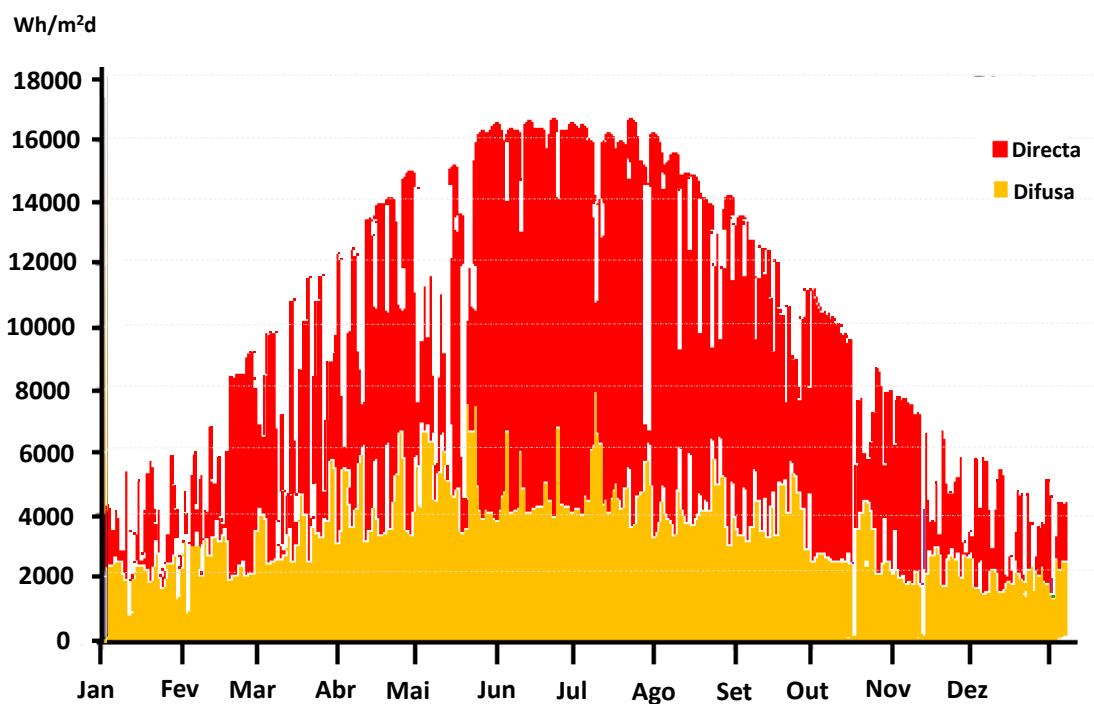


Figura 4.25 - Variação da radiação directa e difusa durante o dia em Lisboa (GREENPRO,2004)

4.3.7.2 - Modelo de Difusão

O *Solar Analyst* permite efectuar o cálculo da radiação difusa segundo dois modelos (cf. secção 4.1): o modelo padrão difuso (*Standart overcast Sky*), onde o fluxo de radiação difusa varia conforme o ângulo zenital e o modelo difuso uniforme (*Uniform Sky*) onde o fluxo de radiação difusa de entrada é a mesma em todas as direcções do céu. Este último modelo foi o escolhido para a modelação, uma vez que, um dos objectivos desta dissertação é obter os valores de irradiação directa. Para que a “parametrização do modelo de difusão” esteja completa é necessário ainda definir qual o número de **divisões do Zénite**, *i.e.*, definir qual o número de divisões de céu (*sky sectors*) a considerar no cálculo do *Skymap*. O *Solar Analyst* tem de ter sempre um valor superior a 0 e que não pode ultrapassar mais de metade do valor de *Sky Size* estabelecido, sendo o valor padrão de 8 divisões. No entanto, como o modelo adoptado não é o *Standart overcast Sky*, o número de divisões do zénite não é relevante e foi mantido o valor padrão, uma vez que, após testar outras divisões se verificou que os obtidos valores permaneceram inalterados. Já no que respeita ao número de divisões do Azimute (número de divisões de céu a considerar no cálculo do *Skymap*) estas devem ser maiores que 0, múltiplas de 8 e inferiores a 160 direcções relativamente ao Norte. Também neste parâmetro foi adoptado a definição padrão de 8 divisões, encerrando assim a introdução de parâmetros para a calibração do modelo.

Pode concluir-se que todas as pesquisas e testes efectuados para encontrar o melhor resultado de cada parâmetro sortiram efeito possibilitando a criação de um melhor modelo. No entanto apesar de todos os esforços para uma boa implementação dos parâmetros no modelo, é sobretudo a introdução de um MDS de elevada resolução que vai ser responsável por uma grande parta do sucesso da modelação. Isto porque a escolha de um MDS com pouco detalhe vai levar que existam falhas na informação da edificação, vegetação e ambiente envolvente que vão afectar o sombreamento da superfície, acabando por afectar a radiação solar e o resultado do modelo.

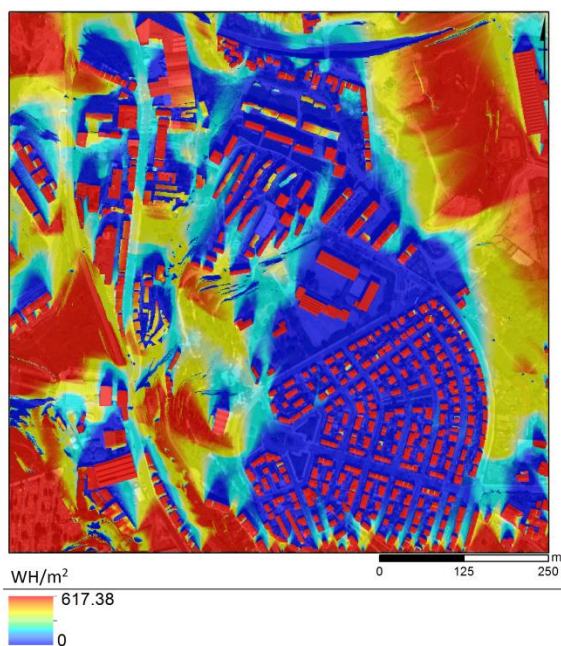
Capítulo 5 - Análise de Resultados

5.1 - Resultados da calibração

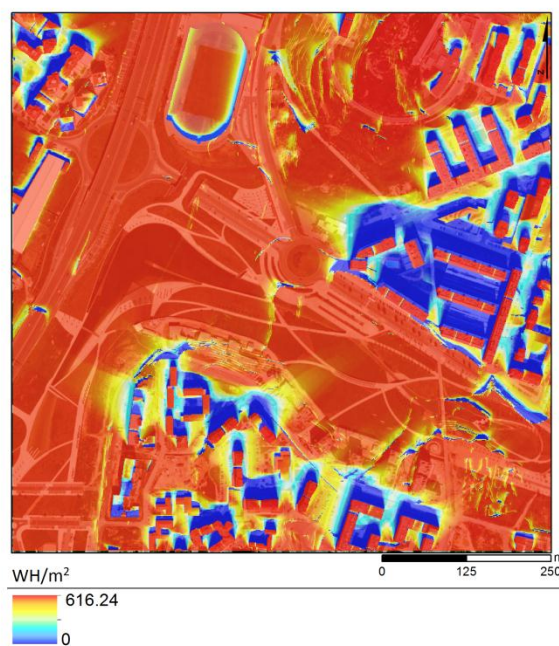
Após serem encontrados os parâmetros “otimizados” para iniciar a modelação foram então gerados para as quatro áreas em estudo os respectivos modelos de radiação solar directa. Assim para o dia 21 de Dezembro os valores de radiação directa, rondam os **600 WH/m²** para as quatro áreas, não existindo grande variação dos valores entre elas, assim o valor mais elevado de radiação solar directa com **617,38 WH/m²** encontra-se na área da **Madre Deus** seguindo-se a **Alta de Lisboa** com **616,24 WH/m²** (apenas menos 1,14 WH/m²), a **Baixa de Lisboa** com **614,92 WH/m²** e por ultimo a área do **Parque das Nações** com **610,86 WH/m²** (Figura 5.1).

Os valores mais elevados de radiação directa total diária são facilmente identificados nos topos dos edifícios e nas áreas livres onde não existem edifícios, e ao abrigo do sombreamento gerados por estes. Já no que diz respeito aos valores mais baixos (zero ou próximos de zero) surgem sobretudo em torno dos edifícios quase criando um efeito “3D”. Nestes casos é praticamente possível identificar as fachadas voltadas a Norte, como é mais perceptível na Alta de Lisboa, Baixa e Parque das Nações.

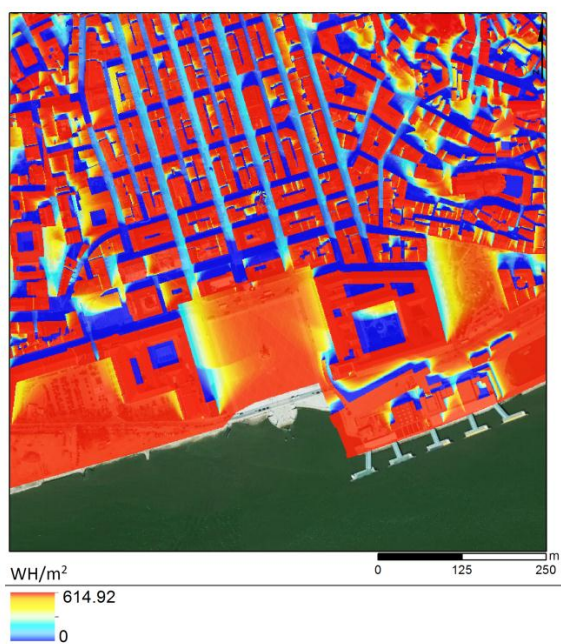
No entanto, é importante referenciar que estes valores totais de radiação directa são resultado da soma dos 19 *outputs* (Figura 4.22) que correspondem aos intervalos de tempo de 30 minutos. Este procedimento tem de ser realizado sempre e para todos os *outputs* do programa (radiação global, difusa) uma vez que o *output* resultante da modelação é referente apenas ao valor do primeiro intervalo de tempo a modelar. A Tabela 5.1 resume a variação horaria da radiação directa para as quatro áreas de estudo para o dia 21 de Dezembro.



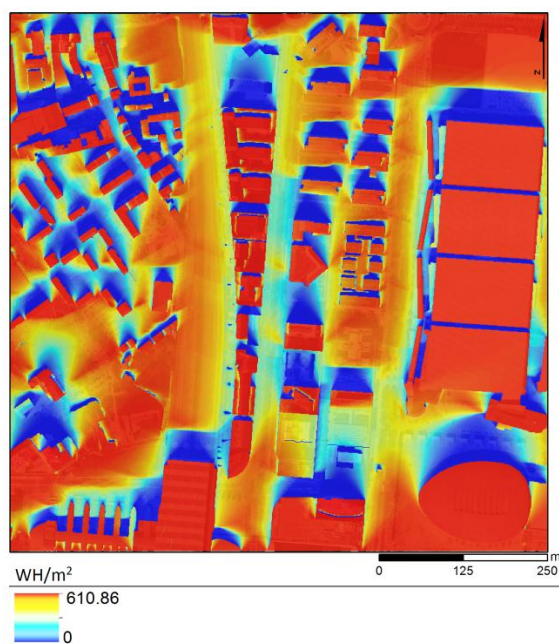
Madre Deus



Alta de Lisboa



Baixa de Lisboa



Parque das Nações

Figura 5.1 - Radiação Directa total diária nas 4 áreas de estudo para o dia 21 de Dezembro

Tabela 5.1 - Variação horária da radiação solar directa (Wh/m²) nas 4 áreas de estudo

Intervalo de tempo (h)	Madre Deus	Alta de Lisboa	Baixa	Parque das Nações
8:00	0,000	0,000	0,000	0,000
8:30	0,498	0,500	0,490	0,486
9:00	4,755	4,760	4,705	4,673
9:30	14,944	14,949	14,830	14,747
10:00	28,729	28,726	28,555	28,410
10:30	43,296	43,279	43,077	42,868
11:00	56,399	56,361	56,149	55,878
11:30	66,450	66,389	66,184	65,858
12:00	72,426	72,341	72,158	71,786
12:30	73,783	73,675	73,524	73,119
13:00	70,403	70,275	70,163	69,738
13:30	62,583	62,440	62,373	61,945
14:00	51,065	50,915	50,893	50,483
14:30	37,101	36,954	36,975	36,608
15:00	22,554	22,425	22,477	22,182
15:30	9,955	9,862	9,924	9,731
16:00	2,374	2,330	2,372	2,290
16:30	0,066	0,063	0,066	0,061
17:00	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	617,38	616,24	614,92	610,86

Ao longo do dia 21 de Dezembro os valores da radiação oscilam entre os **0 Wh/m²** ou valores muito perto de 0 **às primeiras** (8 h e as 9h) e **às últimas** (16h e as 17h) **horas** do dia e os **70 Wh/m²** perto do meio-dia solar (12h e as 13h) onde, a altura máxima do Sol acima do horizonte é atingida, reduzindo a obliquidade e aumentando a quantidade de energia que incide na superfície. O valor máximo de radiação é atingindo de acordo com a Tabela 5.1 às 12h30min em todas as áreas de estudo, sendo novamente a **Madre Deus** a registar o valor mais elevado das quatro áreas com **73,783 Wh/m²**.

Embora o foco desta dissertação seja espacialização da radiação directa para o dia 21 de Dezembro foi também realizado para a área da Madre Deus um modelo para o dia 21 de

Julho para contextualizar a diferença de valores obtidos para o pior dia do ano e para o melhor dia.

Assim a primeira diferença é em relação ao valor do total diário da radiação directa (**4613,20 Wh/m²**) cerca de 8 vezes mais do valor registado para o dia 21 de Dezembro (**617,38 Wh/m²**). Outra diferença está no tempo que o Sol se mantém acima do horizonte, sendo que para o dia **21 de Junho** o Sol nasce pouco mais das 06h30min e o seu ocaso dá-se por volta das 21h perfazendo um total de **15h** contra as **9h30min** (Sol a nascer perto das 8h e pôr-se por volta das 17h) registadas no dia 21 de Dezembro.

A Figura 5.2 traduz a variação entre esses dois dias. O valor máximo de radiação atingido às 12h30min do dia 21 de Dezembro (73,783 Wh/m²) é superado às 9 h do dia 21 de Junho com um valor de 88,169 Wh/m². Quando a altura máxima do Sol no dia 21 de Junho acontece às 13h30min onde também atingido o valor mais elevado de radiação 323,206 Wh/m² sendo mais de metade do valor total registado no dia 21 de Dezembro. É possível verificar ainda que as 17 h do dia 21 de Dezembro o valor é aproximadamente 0 e no dia 21 de Junho a mesma hora ainda se regista um valor de 179,477 Wh/m² valor ainda superior ao máximo registado no dia 21 de Dezembro. Estas amplitudes em nada invalidam os objectivos da dissertação uma vez que com as actuais tecnologias mesmo com baixos valores é possível obter uma grande eficiência.

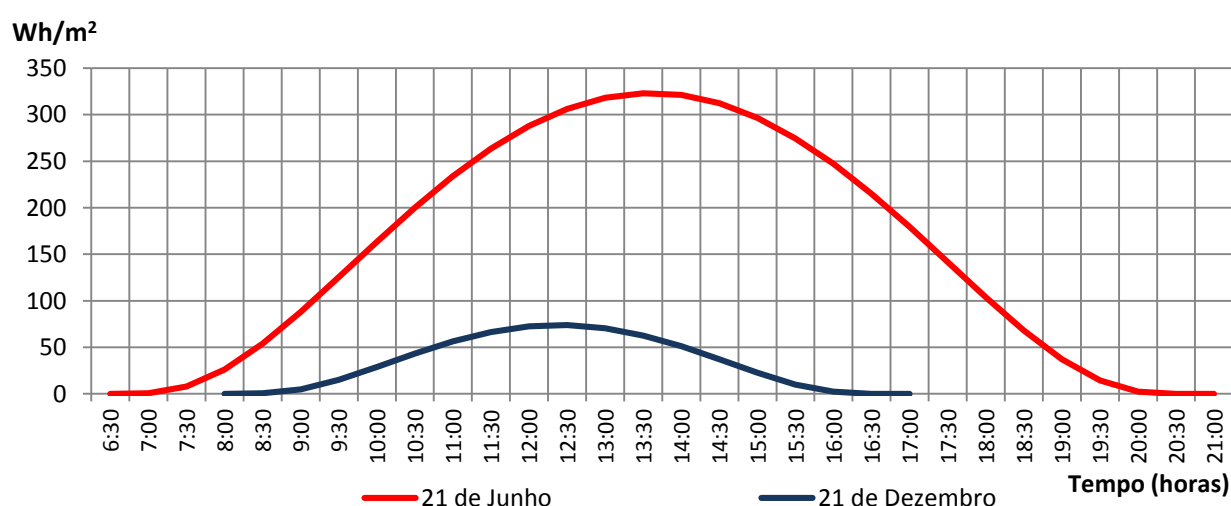


Figura 5.2 - Variação da Radiação solar directa para os dia 21 de Junho e 21 de Dezembro para a Madre Deus

5.2 - Ajustamento dos resultados

Após esta primeira análise conclui-se que os valores mais elevados se encontravam no topo dos edifícios gerando uma sobrestimação dos valores totais, uma vez que o objectivo deste estudo são as áreas no solo e não os topos do edificado que embora seja uma informação importante podem influenciar o total de radiação directa. Assim, com o intuito de reduzir essas redundâncias nos valores optou-se por retirar após a modelação, os valores de radiação referentes aos edifícios através da criação de um mascara (

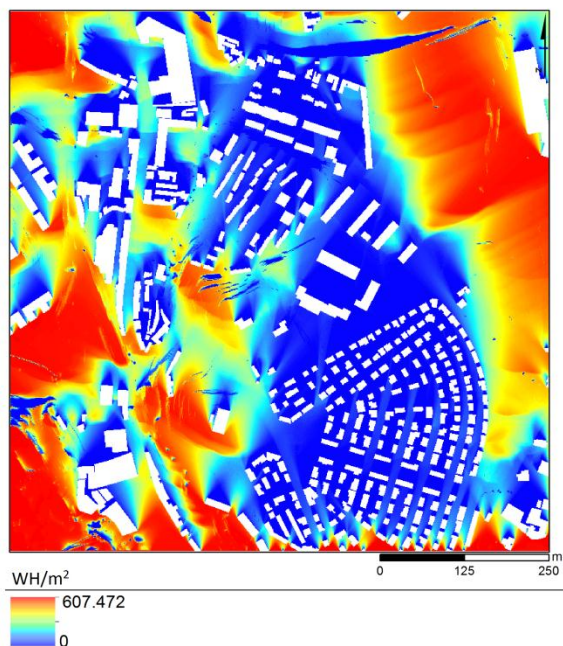
Figura 5.3).

Este procedimento alterou em algumas áreas os valores dos totais de radiação. A **Madre Deus**, antes como a área com maior radiação solar directa ($617,38 \text{ Wh/m}^2$) ocupa agora a terceira posição com um valor de radiação de **$608,65 \text{ Wh/m}^2$** sofrendo uma variação de $8,73 \text{ Wh/m}^2$. A **Alta de Lisboa** é agora a área com maior radiação solar directa mantendo os mesmos **$616,24 \text{ Wh/m}^2$** , esta situação deve-se sobretudo ao facto de ser a área com menos edifícios e maior área disponível. Por isso, nesta área não eram só os edifícios que apresentavam os valores mais elevados, mas sim a área envolvente.

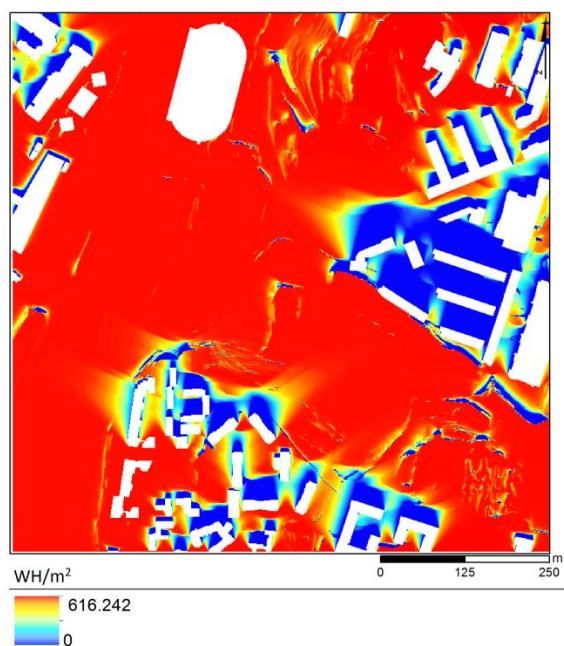
Já a **Baixa de Lisboa** que anteriormente estava na terceira posição é agora a segunda área com maior valor de radiação solar directa com **$610,37 \text{ Wh/m}^2$** perdendo cerca de 5 Wh/m^2 . No entanto, aqui é bastante visível que os valores mais elevados se encontravam no topo dos edifícios clarificando as áreas exactas onde esses valores de radiação são realmente mais baixos. Esta noção era um pouco distorcida pela quantidade de “mancha vermelha” decorrente da inclusão dos topos dos edifícios.

O **Parque das Nações** mantém-se como a área com menos radiação solar directa com **$603,31 \text{ Wh/m}^2$** perdendo cerca de 8 Wh/m^2 com este procedimento. Apesar destas alterações nos totais de radiação, existe pouca variação dos valores de radiação ao longo do dia, sendo a única variação significativa registada na Baixa de Lisboa onde o valor máximo registado às 12:30h é de $70,365 \text{ Wh/m}^2$ perdendo $3,159 \text{ Wh/m}^2$ em relação a anterior metodologia.

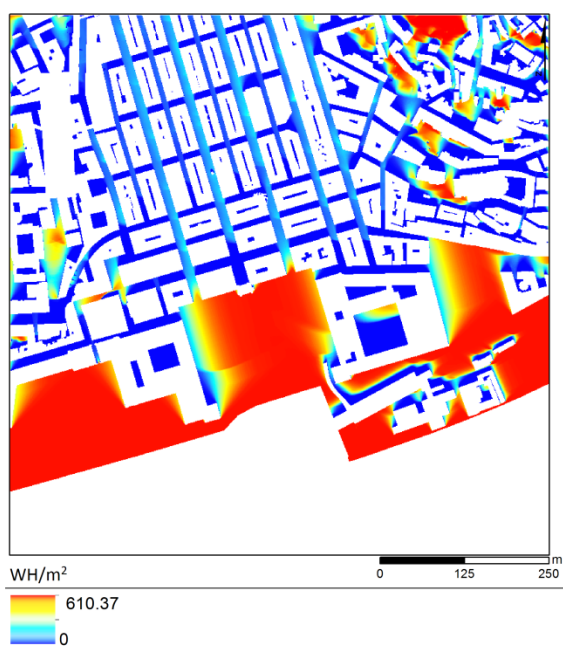
Assim, para os restantes procedimentos realizados durante esta dissertação todos os resultados serão apresentados sem o valor referente ao edificado.



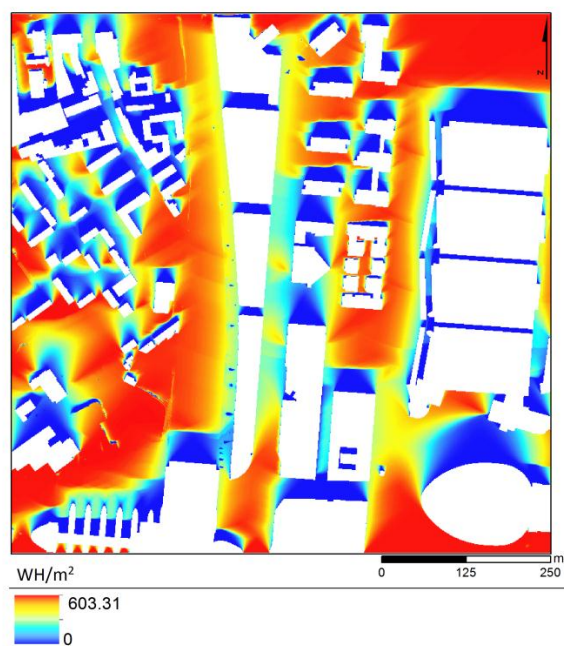
Madre Deus



Alta de Lisboa



Baixa de Lisboa



Parque das Nações

Figura 5.3 - Radiação directa total diária “corrigida” nas 4 áreas de estudo para o dia 21 de Dezembro

5.3 - Distribuição da radiação solar directa pela superfície

Para melhor entender a distribuição da radiação solar e a caracterizar as diferenças entre as diferentes áreas de estudo foi realizado um cruzamento rápido dos modelos de radiação solar directa obtidos anteriormente com as cartas de declives e de exposições de cada uma das áreas em estudo.

5.3.1 - Declives

Com base no MDT (Tabela 4.3) foi gerada uma carta de declives em graus com a resolução de 1m. Esta escolha foi feita para facilitar a interpretação da mesma, uma vez que numa carta de declives em percentagem (varia entre 0 e infinito) a interpretação seria mais dificultada. Após terem sido criadas, as respectivas cartas foram reclassificadas em seis classes; 0-2; 2-5; 5-10;10-15;15-25 e > 25, e cruzadas com os mapas de radiação.

A Figura 5.4 resume o cruzamento entre as cartas de declives e os modelos de radiação. Em todas as áreas é a classe de declive de 0–2 graus que concentra maiores áreas, com excepção da Madre Deus onde a classe de declive mais representativa é a de 2 a 5 graus. Também na Alta de Lisboa esta classe é bastante representativa, podendo-se concluir assim que do ponto de vista da morfologia do terreno estas quatro áreas são bastante semelhantes e na sua maioria relativamente planas. Apenas o bairro Madre Deus difere, apresentando alguma irregularidade na superfície.

Ao comparar os valores de radiação, a Madre Deus e o Parque das Nações apresentam valores médios equidistantes dos valores máximos e mínimos em todas as classes de declive, ao contrário do que acontece na Baixa e na Alta de Lisboa. Na Baixa os valores de radiação médios rondam perto dos valores mínimos excepto na classe de declive dos 0-2 graus. Já na Alta de Lisboa os valores médios são muito próximos dos valores máximos.

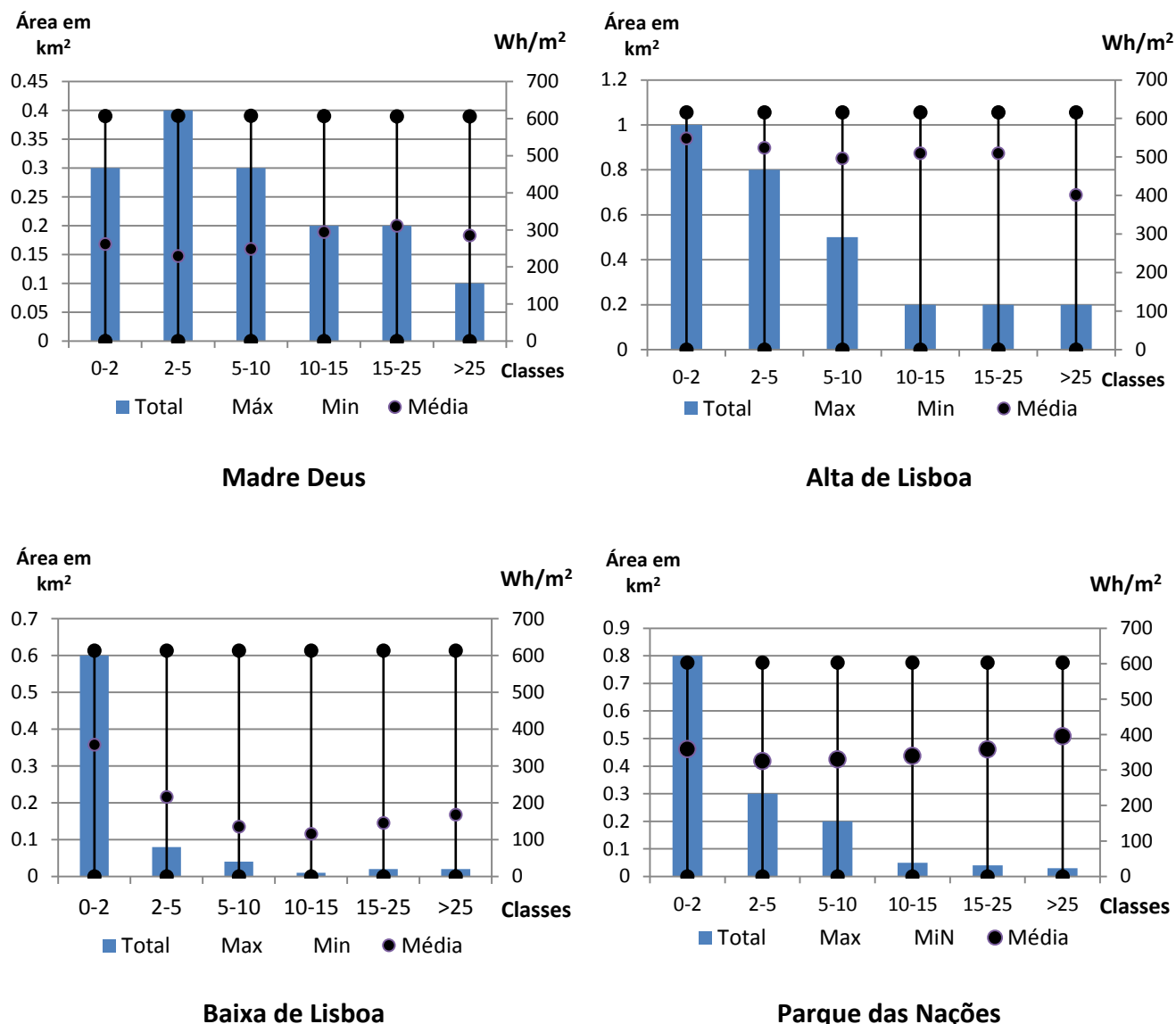


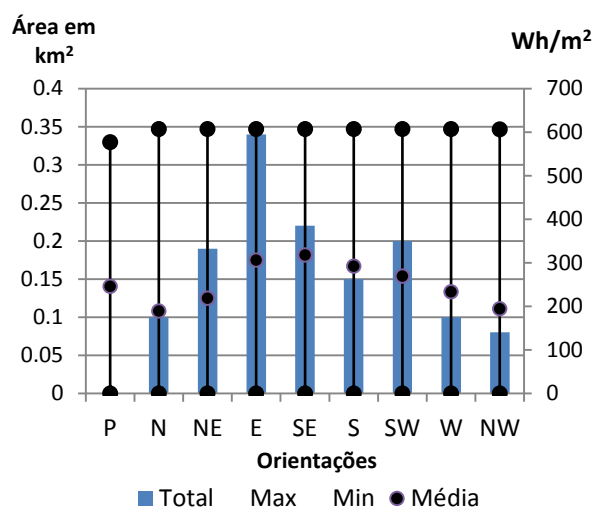
Figura 5.4 - Distribuição da radiação directa em função do declive

5.3.2 - Exposições

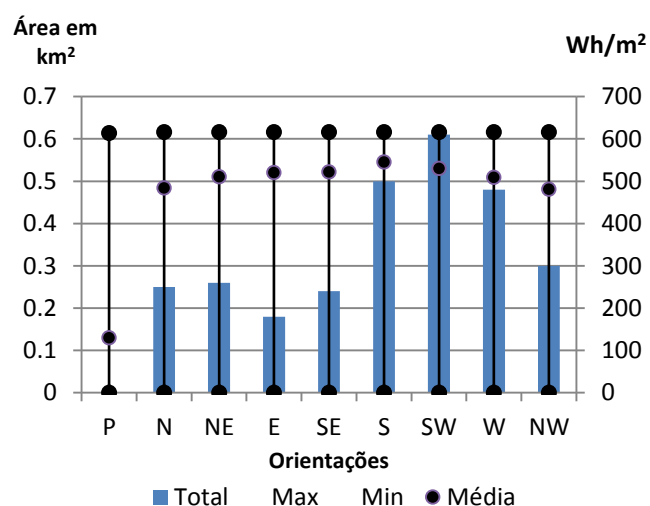
As cartas de exposições foram geradas a partir do MDT inicial assim com as de declive, tendo sido classificadas em nove classes N, NE, E, SE, S, SW, W, NW e terreno Plano. Excluindo o terreno plano, as classes são definidas em oito octantes, correspondendo à rosa-dos-ventos, sendo que estes são definidos em intervalos constantes de 45° e a orientação faz-se a partir do Norte no sentido dos ponteiros do relógio.

A Figura 5.5 traduz os cruzamentos entre a carta de exposições e o modelo de radiação. Assim, é possível ver que a **Madre Deus** e o **Parque das Nações** têm maior parte

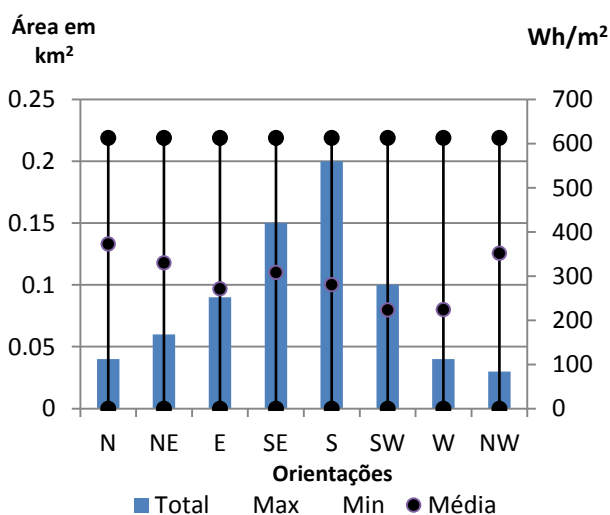
das suas áreas voltadas **Este** (E) e a **Sudeste** (SE). Na **Alta de Lisboa** a grande maioria das áreas estão voltadas a **Sudoeste** (SW), sendo que as áreas voltadas a Sul (S) e a Oeste (W) também são bastante expressivas. Já a **Baixa de Lisboa** tem a grande maioria da área exposta a **Sul**.



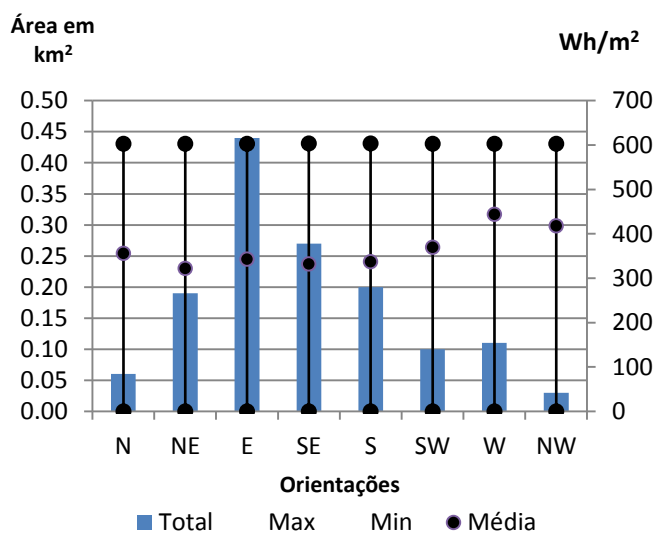
Madre Deus



Alta de Lisboa



Baixa de Lisboa



Parque das Nações

Figura 5.5 - Distribuição da radiação directa em função das exposições

5.4 - Variação da radiação a diferentes alturas do solo

A quantidade de radiação está directamente ligada ao ângulo de obstrução (céu visível) (Figura 5.6). A maior ou menor obstrução do céu é causada pela altura dos edifícios, pela própria largura das ruas e pela altura e posição do Sol (época do ano e variação diária).

Com base nos parâmetros introduzidos na modelação, a **Baixa de Lisboa** apresenta-se como a área com maior obstrução (94%) com apenas **6 %** da área de visível, por outro lado a **Alta de Lisboa** com **70%** da área é visível, **não se encontra obstruída**. A Madre Deus e o Parque das Nações apresentam quase a mesma área não obstruída a **Madre Deus** com **43,5%** e o **Parque das Nações** com **46,4%**.

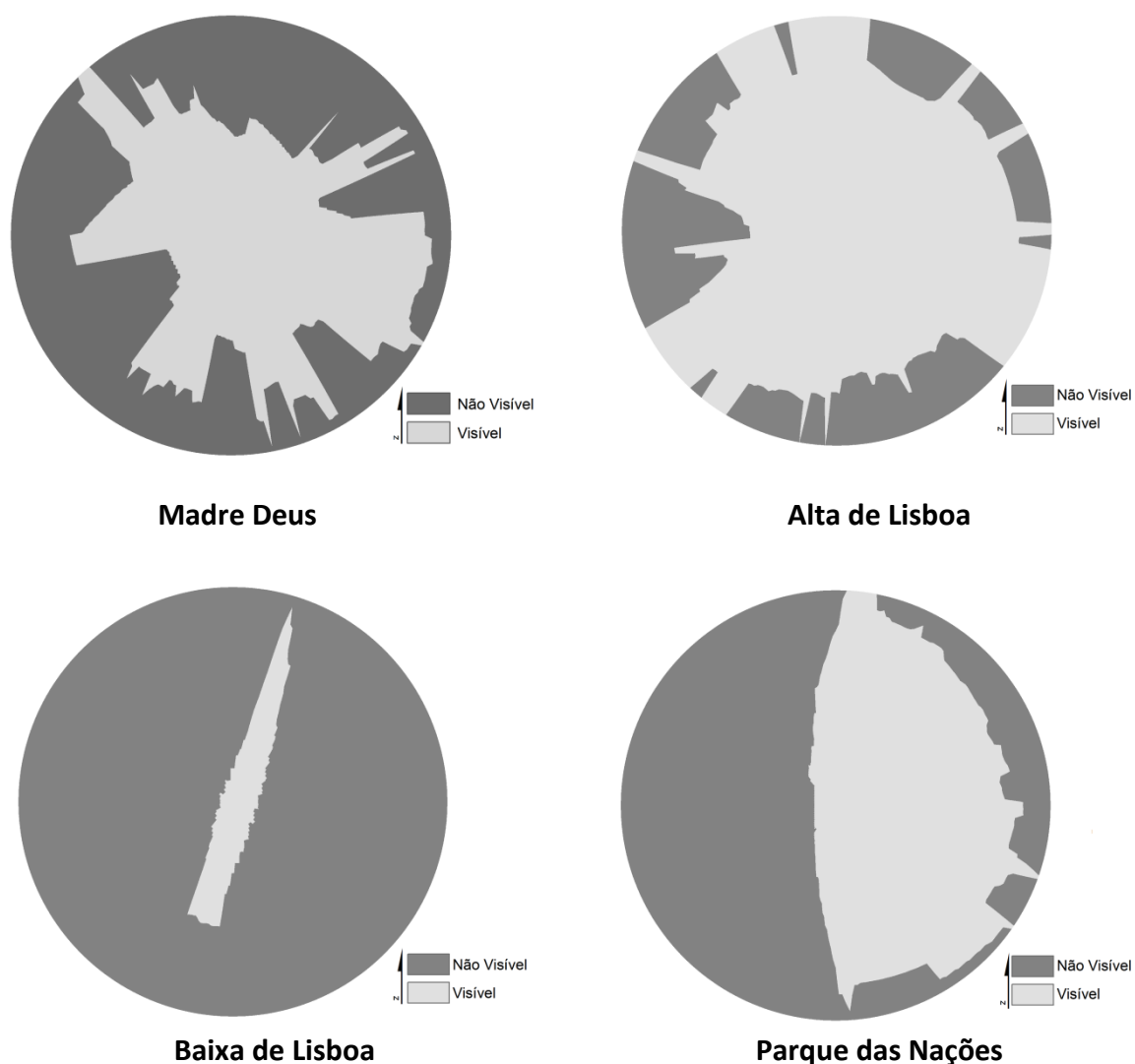


Figura 5.6 - Área (céu) não obstruída nas 4 áreas de estudo. *Solar Graphics* do *Solar Analyst*

Assim, com o intuito de melhorar os valores de radiação obtidos nos modelos reduzindo o ângulo de obstrução, *i.e.*, aumentando a área de céu visível, optou-se por subir o nível do solo em relação ao edificado iniciando-se a modelação a 0 metros como tem sido realizado até aqui, mas subindo metro a metro até ao patamar dos 10 metros. Como se observar na Figura 5.7 à medida que o nível do solo sobe, o ângulo de incidência dos raios solares vai-se alterando.

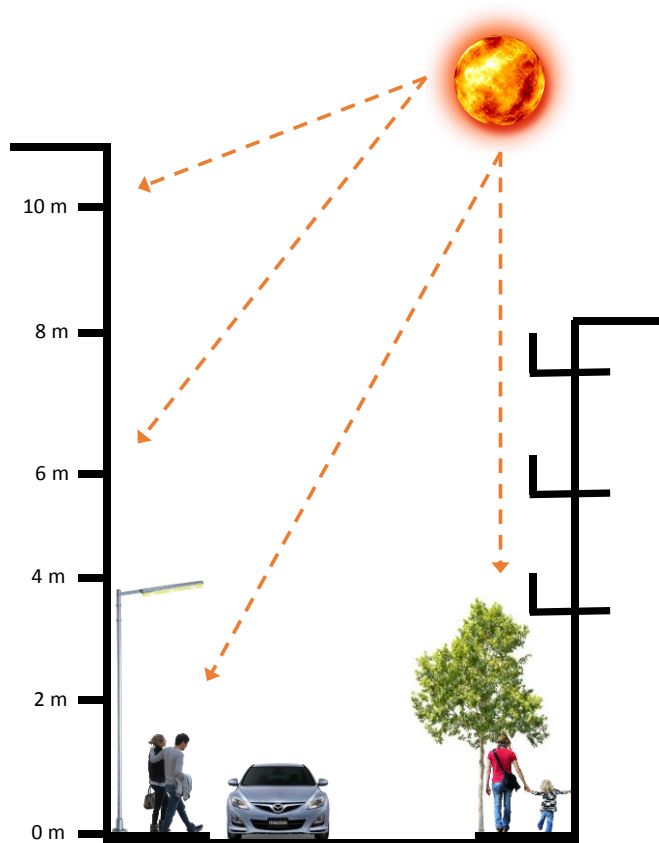


Figura 5.7 - Variação esquemática do nível do solo (Adaptado de Higuera, 2006)

No, entanto para que seja realizada esta modelação e porque inicialmente foi escolhido o método em área para efectuar a modelação solar é necessário manualmente adicionar esse aumento do nível do solo ao MDS usado na modelação. Esta é uma das desvantagens do uso do método em área, que ao contrario do método em pontos não permite indicar a que altura do solo está a ser realizada a modelação sem que tenham de ser realizadas alterações físicas no modelo de superfície utilizado.

Assim, foram gerados a partir do MDS corrigido original mais 10 MDS (ou seja 40 MDS 10 por cada área de estudo) através da seguinte condição:

$$Con(MDA \geq 0, MDA), MDT + x \quad (5.1)$$

Onde MDA corresponde ao Modelo digital de alturas de cada área de estudo, MDT corresponde ao Modelo digital de terreno de cada área de estudo e x corresponde ao valor em metros a adicionar (*i.e.*, 1, 2, 3, ..., 10).

Após gerados os novos MDS foi realizada nova calibração, desta vez cada um dos MDS como ficheiro de entrada. A Figura 5.8 representa os resultados para a 1, 5 e 10 metros.

Ao analisar de forma geral os resultados, ressalva que a área que apresenta mais diferenças é a Madre Deus. O facto de se aumentar um metro ao terreno é o suficiente para que as áreas antes representadas a azul (menos radiação) passam a ser áreas representadas a vermelho (mais radiação) é visível também que à medida que aumenta o nível do solo (ou reduzindo a altura do edifício) as áreas e as fachadas voltadas a Norte e a Noroeste passam a registar valores mais elevados de radiação deixando apenas as áreas e fachadas voltadas a Nordeste com os valores mais baixos. Pode-se assim concluir que para o caso da Madre Deus, se a estrutura de aproveitamento energético for instalada a pelo menos 1 metro do nível do solo, será bastante mais eficiente do que junto ao solo.

Em relação a Alta de Lisboa o facto se elevar o nível do solo não trás tanto benefício como acontece na Madre Deus, onde essas alterações são sobretudo o aumento dos valores de radiação junto dos edifícios, reduzindo assim o sombreamento (entenda-se áreas com valores de radiação muito baixos). Assim, no caso da Alta de Lisboa não se encontra especial vantagem em colocar equipamentos que não ao nível do solo. O Parque das Nações apresenta uma situação em todo semelhante à Alta de Lisboa fazendo com que o aumento do nível do solo também não tenha especial vantagem.

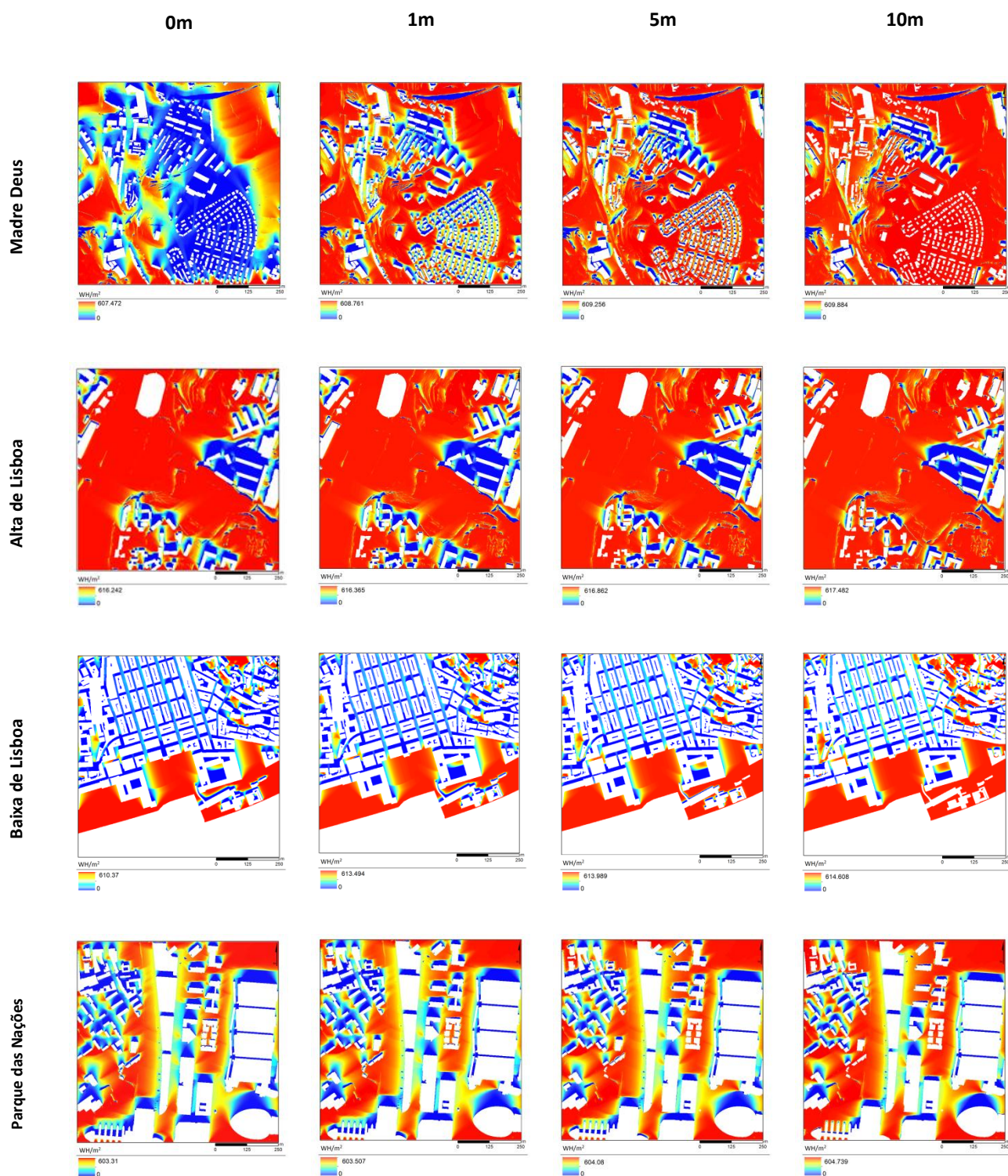


Figura 5.8 - Variação da radiação a diferentes níveis do solo

A Baixa de Lisboa pode parecer que se encontra na mesma situação descrita na Alta de Lisboa e no Parque das Nações. No entanto, a Baixa apresenta uma dinâmica distinta. Ao analisar os resultados é possível observar de imediato que as áreas laterais (de encosta)

aumentam e passam a ser áreas com valor de radiação mais elevado. No entanto apesar destas alterações em relação às áreas de encosta também as outras áreas sofrem alterações, apesar de mais subtis. A particularidade da Baixa de Lisboa está no traçado e orientação das ruas (Figura 5.9), a sua malha ortogonal origina ruas de direcção Norte-Sul, que por sua vez originam fachadas orientadas a Este e a Oeste, e com orientação Este-Oeste que conduzem fachadas orientadas a Norte e Sul. É precisamente nestas duas orientações distintas que se centram essas diferenças de radiação.

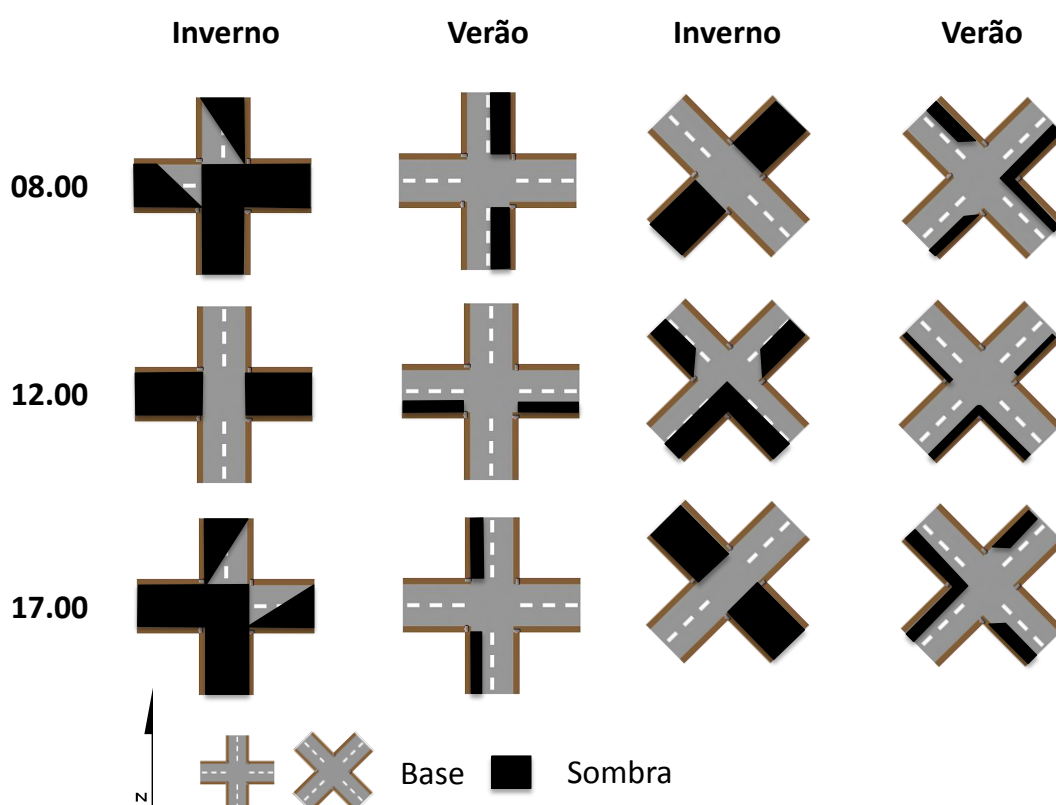


Figura 5.9 - Orientação das ruas

As ruas com orientação N-S geram fachadas de orientação E-O onde o Sol incide pela manhã no lado Este e pela tarde no lado Oeste, o que embora permita que todas as fachadas tenham radiação não invalida que nas horas centrais do dia (às 12 h no Inverno e às 13:30h no Verão) e que especialmente no Inverno, esses valores sejam bastante baixos (Figura 5.2) representado as áreas a azul. Apesar dos baixos valores nota-se ao aumentar a sobrelevação do solo um incremento, ainda que ligeiro, dos valores de radiação nas ruas de direcção N-S, situação que não verifica nos quadrantes onde as ruas têm direcção E-O.

No caso (E-O), apesar de os edifícios apresentarem uma fachada indicada para o Verão (Norte) e para o Inverno (fachada sul), ao analisar os resultados verificamos que o facto de aumentar o nível de elevação do solo não se traduz num aumento, nem que ligeiro, nos valores de radiação, contrariamente ao que sucede com as ruas de orientação N-S. Assim, podemos concluir que no caso da baixa o facto de aumentar o nível do solo (ou seja diminuir a altura do edifício) é necessário ter também em conta a largura das ruas.

Ao traçar um perfil de direcção E-O (Figura 5.10) é possível comprovar que a altura mais frequente dos edifícios situa-se em torno dos 35 metros e que o espaçamento entre os edifícios é de aproximadamente 10 metros.

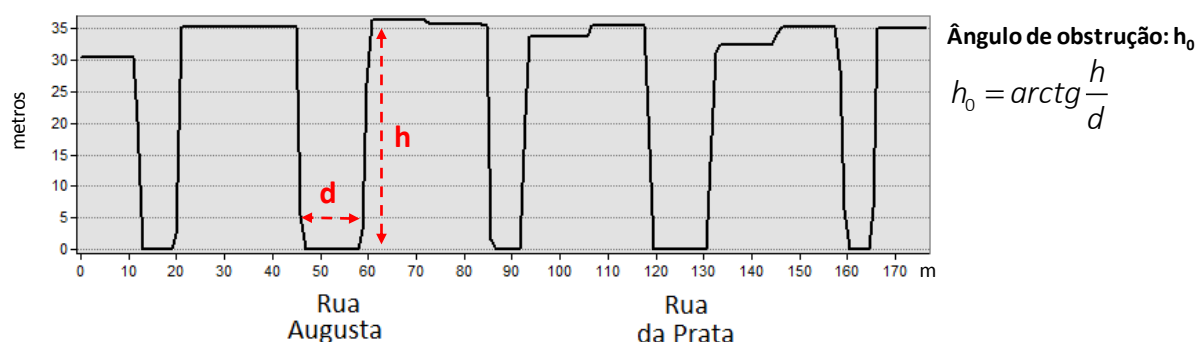


Figura 5.10 - Perfil transversal direcção E-O da Baixa de Lisboa

Assim, a título demonstrativo foram realizados dois testes: um com os edifícios da área da Baixa (Figura 5.11), ignorando as edificações envolventes e outro com um único edifício (Figura 5.12) com uma altura de 35 metros colocado numa circunferência de 10 metros de raio representado a largura média da rua. Ambos os testes foram integrados ao longo do dia, desde as 8h até às 17h, com intervalos de 30 e 60 minutos, no primeiro e segundo caso, respectivamente.

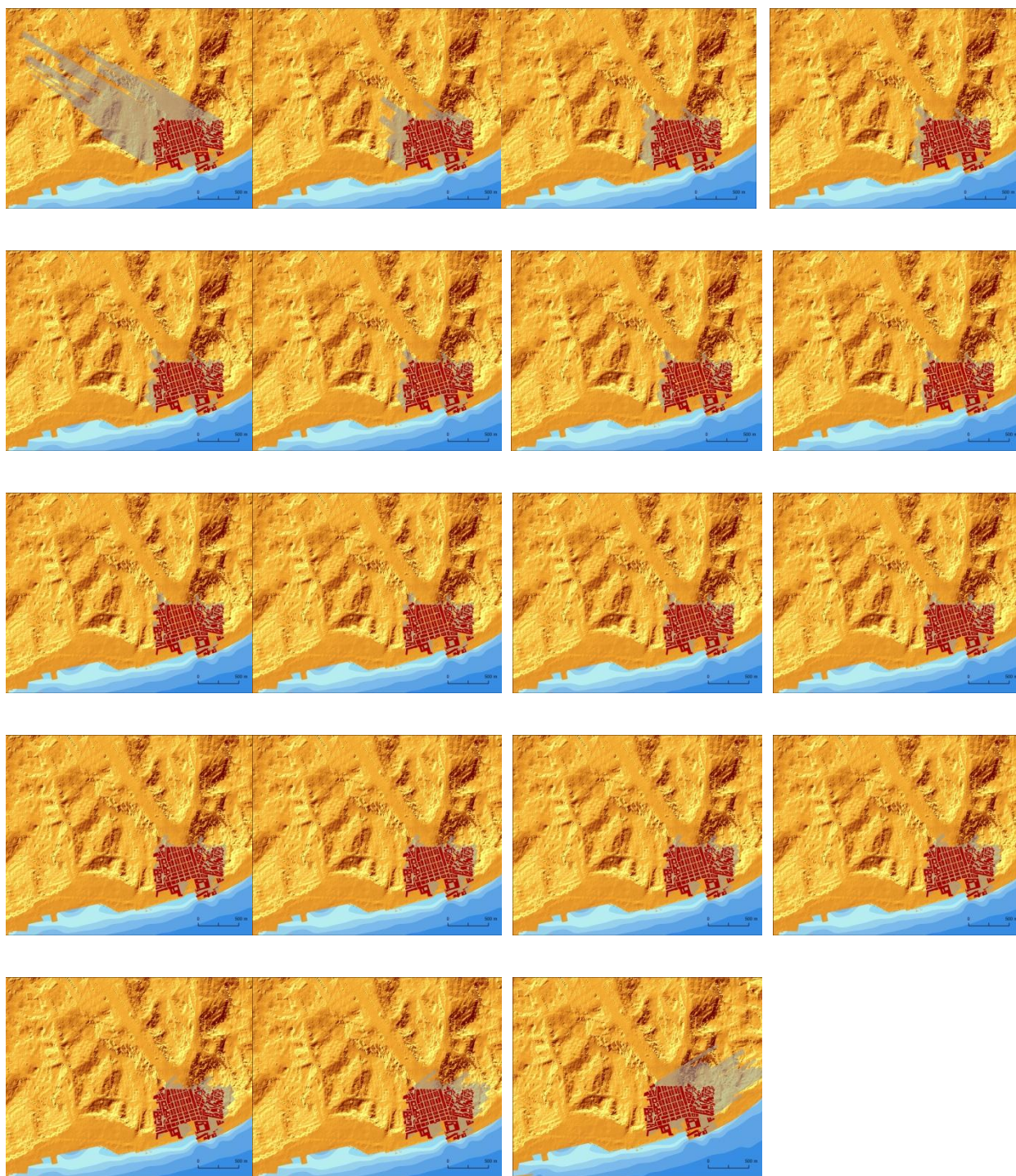


Figura 5.11 - Sombreamento da área da Baixa de Lisboa (da esquerda para a direita e decima para baixo: das 8h até às 17h, com intervalos de 30 minutos)

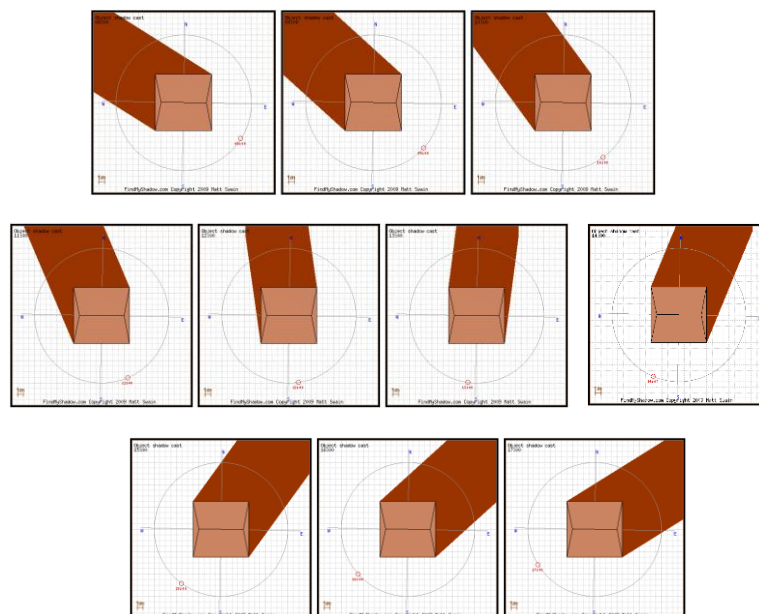


Figura 5.12 - Sombreamento de um edifício padrão da Baixa de Lisboa (da esquerda para a direita e decima para baixo: das 8h até às 17h, com intervalos de 60 minutos)

Foram testados diversos diâmetros de círculo e conclui-se que para que não exista sombreamento, ou que este se faça sentir o menos possível, a largura da rua tem de ser igual o superior a altura dos edifícios, uma vez que aumentar a largura das ruas ou diminuir a altura dos edifícios faz com que a obstrução solar seja menor. Na Tabela 5.2 pode-se verificar que para um edifício de 15 metros de altura, mesmo às 12h30m do dia 21 de Dezembro, seria necessário ter uma rua com mais de 29 metros de largura para que esta não estivesse sempre encoberta. Mesmo para um edifício de 5 metros, só na altura em que o Sol está mais elevado é que a rua estaria fora da penumbra. Esta situação é representativa da importância do sombreamento em todo este processo e justifica por si só uma análise mais detalhada a este tipo de ocorrência.

Tabela 5.2 - Comprimento das sombras a diferentes horas do dia para dois edifícios tipo (15 e 5 metros de altura)

Edifício de 15 m		Edifício de 5 m	
Hora	Sombra (m)	Hora	Sombra (m)
8:00	1316,53	8:00	438,84
8:30	155,26	8:30	51,75
9:00	84,38	9:00	28,13
9:30	58,94	9:30	19,65
10:00	46,04	10:00	15,35
10:30	38,46	10:30	12,82
11:00	33,72	11:00	11,24
11:30	30,76	11:30	10,25
12:00	29,08	12:00	9,69
12:30	28,44	12:30	9,48
13:00	28,77	13:00	9,59
13:30	30,11	13:30	10,04
14:00	32,64	14:00	10,88
14:30	36,75	14:30	12,25
15:00	43,27	15:00	14,42
15:30	54,09	15:30	18,03
16:00	74,20	16:00	24,73
16:30	122,64	16:30	40,88
17:00	391,22	17:00	130,41

5.5 - Sombreamento

Outro aspecto importante na modelação solar é o sombreamento. É conveniente conhecer as sombras sobretudo em áreas urbanas onde a obstrução é mais elevada e onde os edifícios frequentemente geram sombreamento simultâneos. Assim, uma das mais-valias da utilização deste modelo solar é o facto de se poder determinar as sombras projectadas pelos obstáculos a qualquer hora do dia (Figura 4.22).

O último ponto a abordar nesta análise é classificação das áreas de sombreamento (entenda-se por sombreamento áreas com baixo valor de radiação), sendo que para o dia mais desfavorável do ano (21 de Dezembro) o equipamento não deve ter mais de 30% da superfície útil de captação coberta por sombras durante mais de 1 hora.

Assim, o primeiro procedimento na classificação do sombreamento procedeu-se a uma normalização dos valores de radiação. Sendo que, na natureza não existem fronteiras lineares, mas sim, uma mudança contínua de uma fronteira de classes. O escalonamento dos valores foi realizado com base no comportamento da curva de probabilidades recorrendo-se para tal à lógica difusa (Rocha,2012).

A **lógica difusa** (*Fuzzy*) avalia a possibilidade de cada célula pertencer a um conjunto difuso, a partir da análise de toda a série de funções de pertença difusa, combinando a lógica polivalente (uma lógica probabilística), com o intuito de representar o modo humano de pensar e agir (Rocha, 2012).

Para aplicar a lógica difusa é necessário conhecer e compreender a relação entre os critérios e o conjunto de decisões, de modo a inteirarmo-nos que função utilizar. Neste caso de estudo, considerou-se a **função sigmoideal**, uma vez que os dados de entrada são contínuos, modificando-se a sua orientação entre o crescente e o decrescente (Figura 5.13).

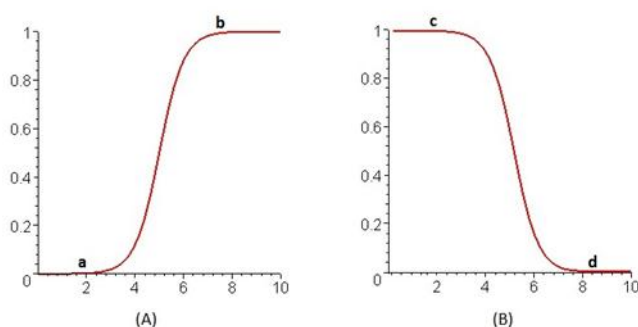


Figura 5.13 - Probabilidade segundo a orientação da função sigmoideal: A) crescente e B) decrescente

Para compreender qual a orientação a escolher, exemplifica-se o caso em estudo: sabendo que os valores variam consoante as células vizinhas, fortalecendo a sua continuidade, então, quanto mais elevado for o valor de radiação solar directa maior

probabilidade de aí ser colocado um dispositivo de aproveitamento solar, ou seja neste caso a diminuição da radiação corresponde à função decrescente ou seja perda de aptidão.

Após a escolha da função os mapas resultantes do total de radiação directa (Wh/m^2) foram transformados através da lógica difusa, *i.e.*, passagem das diferentes unidades que caracterizam os mapas para uma escala de valores com amplitude entre 0 e 1, sendo que 1 corresponde à maior probabilidade de ocorrência, isto de ser colocado um dispositivo.

Depois do escalonamento dos mapas estes foram reclassificados cinco classes conforme as representadas na tabela Tabela 5.3.

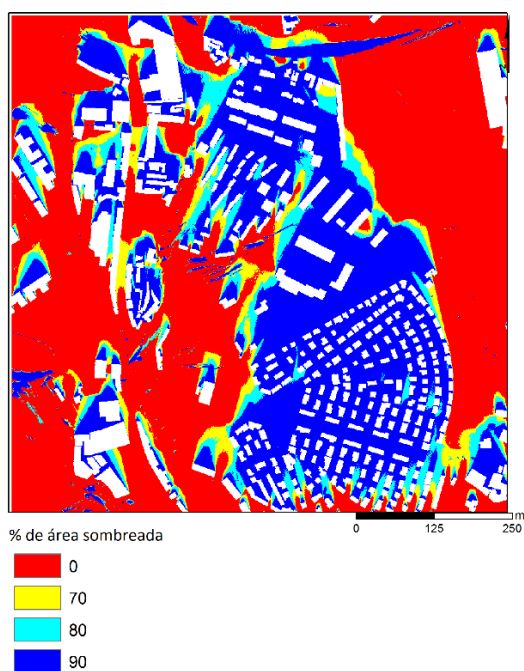
Tabela 5.3 - Classes de sombreamento

Classes	Área Sombreada (%)
[0,0-0,7[	0
[0,7-0,8[	70
[0,8-0,9[	80
[0,9-1,0[	90
[1,0-1,1]	100

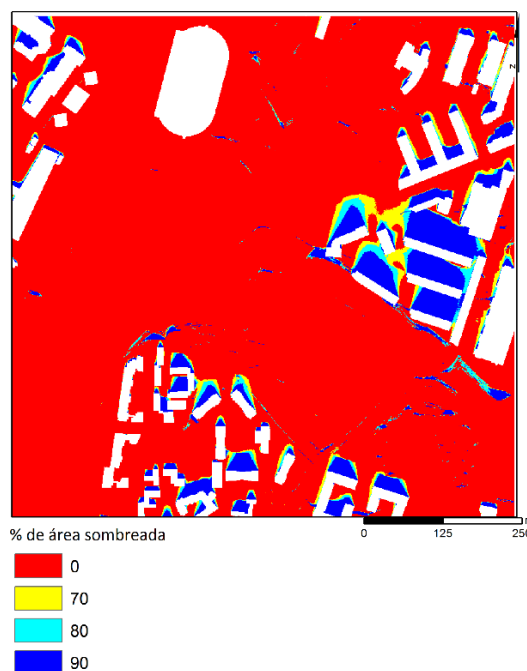
A Figura 5.14 representa a percentagem de sombras a 0 metros, tendo por base os modelos totais de radiação directa. A Madre Deus apresenta uma área de 53,4% de área considerada não sombreada, *i.e.*, representada pela classe 0 (vermelho) e 32,9% de área com 90% de sombreamento (classe 90). Esse sombreamento acontece sobretudo nas áreas onde a densidade de edificado é superior. Analisando a área sombreada por classe de tempo definida (30 minutos) verifica-se que às 8h a área não sombreada corresponde a apenas 26% da área disponível, sendo que 70% se encontram na classe de 90% de sombreamento. Na última hora do dia (17h) a área sombreada (na classe 90%) é de 86%, *i.e.*, ligeiramente superior ao valor registado à primeira hora modelada.

Na Alta de Lisboa, como seria de esperar dado a sua morfologia urbana, a área total não sombreada (classe 0) é de 89,6%, sendo que apenas 6,5 % da área se encontra numa situação de sombreamento quase total. Essas áreas ocorrem sobretudo junto aos edifícios, no entanto às 8h a área sombreada (classe 90) é de 63% no entanto às 17h esse valor é de 54%. Assim, ao contrário do verificado na Madre Deus, onde o sombreamento da tarde é

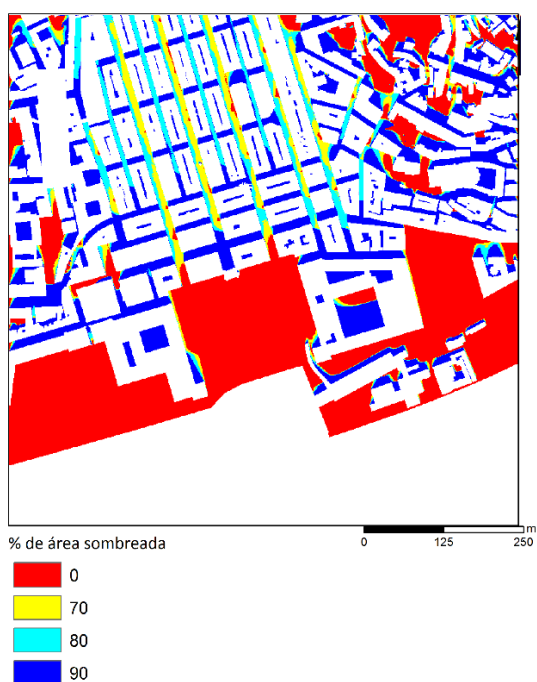
superior ao registado pela manhã, na Alta de Lisboa esta situação inverte-se, sendo que às últimas horas de modelação a área de sombreamento quase total sofre uma diminuição.



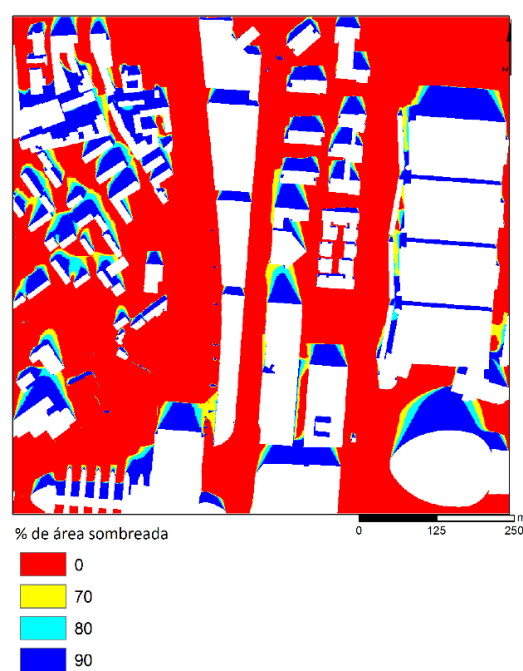
Madre Deus



Alta de Lisboa



Baixa de Lisboa



Parque das Nações

Figura 5.14 - Sombreamento a 0 metros

A Baixa apresenta 50,4% de área não sombreada, sendo que às 8h essa área é de 27%, valor esse que decresce para 16% às 17h. Como é possível ver pelos números entre a

Baixa e a Madre Deus, a Baixa dispõe, ainda que ligeiramente, de mais área não sombreada, sendo que em ambas a área de sombreamento da tarde é superior à registada pela manhã.

Por último, o Parque das Nações apresenta um total de 73% de área não sombreada. É a segunda com maior área não sombreada, sendo superada apenas pela Alta de Lisboa. No entanto, ao contrário das outras áreas, a área sombreada registada às 8h e às 17h é semelhante. Em suma, se quisermos eleger uma área com maior aptidão para a colocação de um sistema solar apenas com base na área não sombreada a escolha óbvia seria a Alta de Lisboa, seguida do Parque das Nações. A Madre Deus segundo este critério é a área menos apta.

Fazendo uma análise da situação para diferentes alturas (

Figura 5.15) verifica-se que na alta de Lisboa, mesmo junto ao solo (0 m de sobreelevação), existem 497697 m² de área que estão menos de 70% do tempo à sombra, correspondendo a 89,65% do total da área disponível. Como seria expectável a quantidade de área com sombra diminui à medida que a base de medida vai sendo sobreelevada (até atingir os 10 m). Esta situação verifica-se tanto na classe de menos de 70% de sombra como nas estantes, *i.e.*, de 70% a 79%, de 80% a 89% e 90% e mais.

Analisando os dados, não por altitude, mas por classe de percentagem de área sombreada, observa-se que, na generalidade, a quantidade de área diminui à medida que se consideram classes em que o espaço se encontra mais tempo à sombra. A excepção ocorre na classe superior (90% e mais) que possui valores de área superiores às duas classes que a precedem, nomeadamente as de 70% a 79% e de 80% a 89%. Esta situação deve-se à estrutura morfológica bastante assimétrica a que se assiste nesta zona (*cf.* ponto 4.2).

A Baixa e o Parque das Nações têm um comportamento em tudo semelhante à Alta de Lisboa, apenas divergindo ligeiramente nos valores apurados. Nesta análise destoa o Bairro Madre Deus com mais de 30% da área ao nível do solo a estar mais de 90% do tempo à sombra. Estes valores confirmam os resultados retirados da Figura 5.14 e advêm de uma morfologia composta por vias não muito largas, mas também com edifícios relativamente baixos

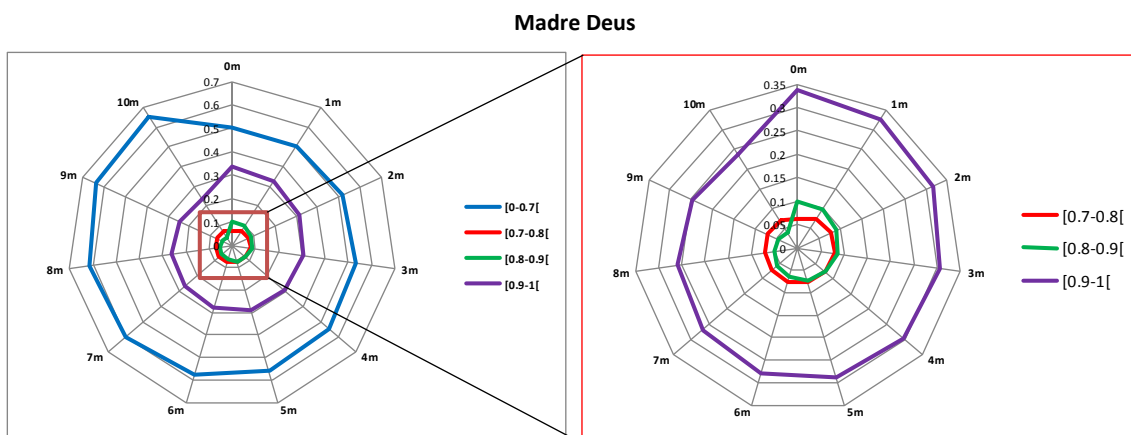
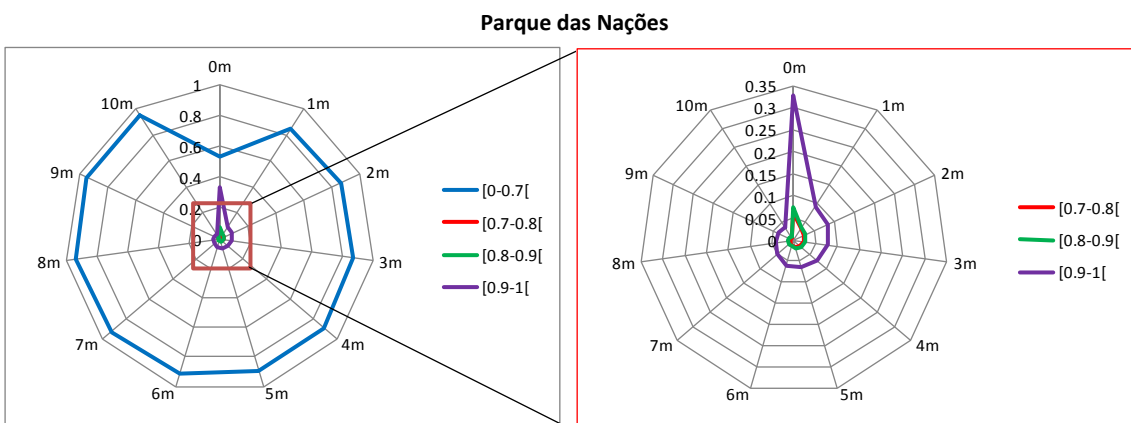
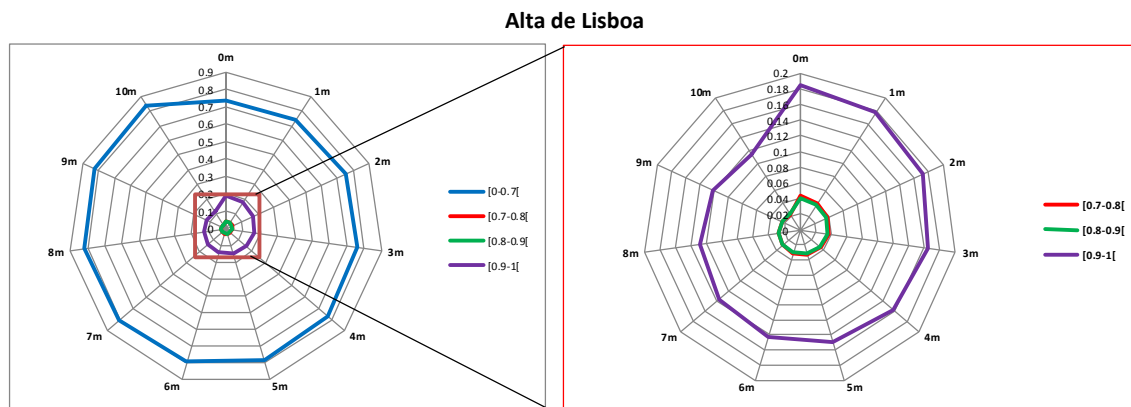
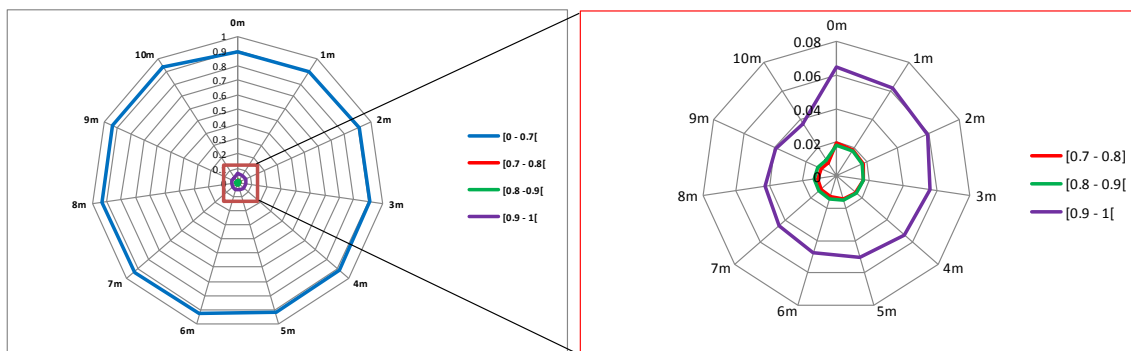


Figura 5.15 - Percentagem de área sombreada a diferentes sobrelevações do solo (passos de 1 metro)

Realizando uma observação cruzada (Figura 5.16) entre 3 sobrelevações do solo padrão (*i.e.*, 0, 5 e 10 metros), com os três momentos horários de referência, mas precisamente o início do dia (8h00m), o meio-dia (12h30m correspondendo ao ponto mais alto do Sol) e o fim do dia (17h00m).

Verifica-se que a qualquer hora e a qualquer altura as classes mais representadas são sempre as abaixo do 70% e acima dos 90% de tempo de área sombreada. Como seria expectável, à medida que se sobreleva o solo a sombra diminui. Na classe mais importante, a das áreas sombreadas mais de 90% do dia, às 8 da manhã destaca-se o Parque das Nações como a área menos apta, seguido de muito perto pela Alta de Lisboa. Esta situação varia bastante ao longo do dia, pois às 12h esse valor é mais alto na baixa e às 17h no bairro Madre Deus.

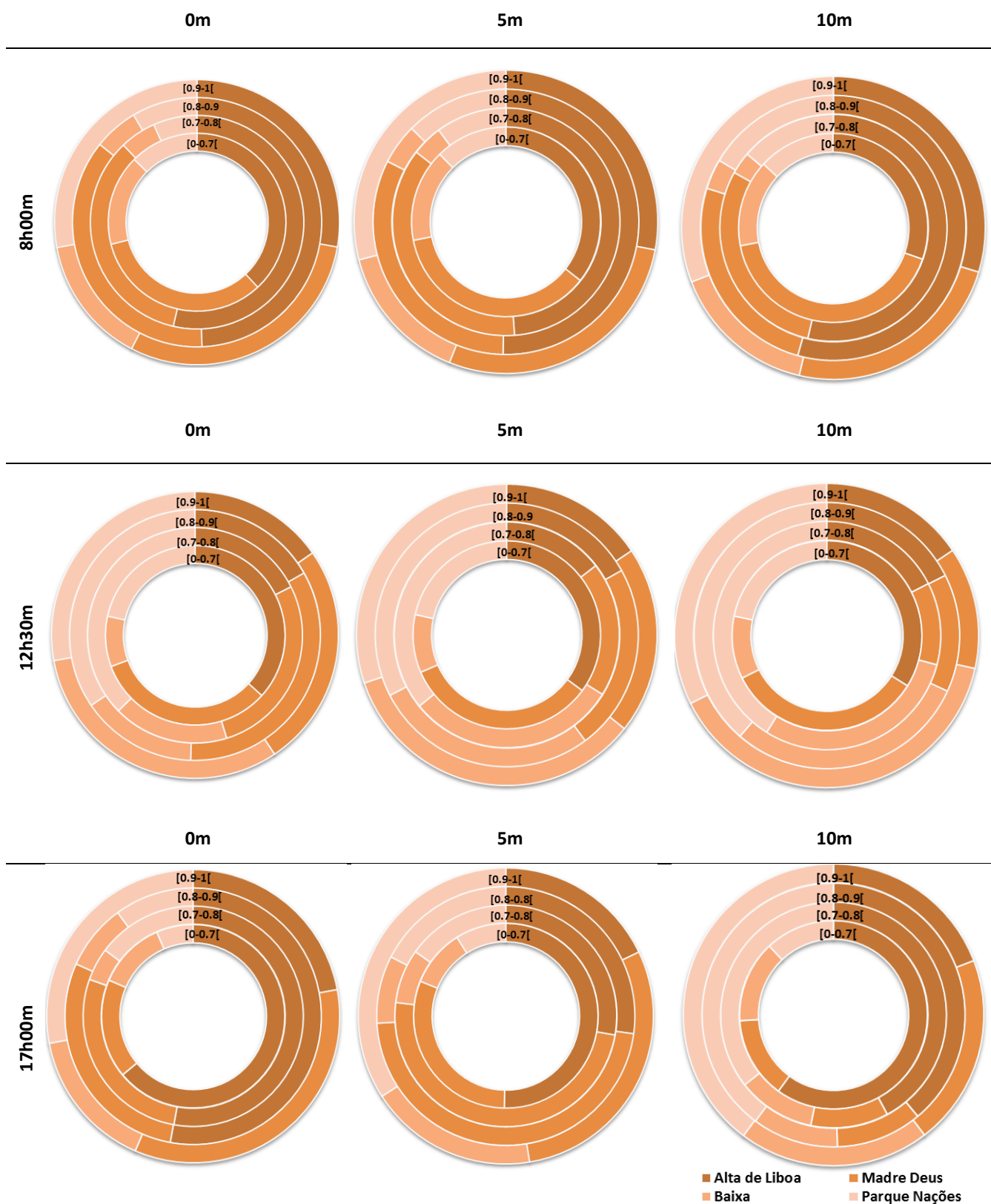


Figura 5.16 - Percentagem de área sombreada a diferentes horas do dia e a diferentes níveis do solo

Capítulo 6 - Considerações Finais

Segundo Vallêra (2006), um dos grandes benefícios potenciais das energias renováveis e da energia solar em particular, resulta da criação de todo um processo, desde a investigação e desenvolvimento à concepção, produção, projecto, instalação e exploração.

Assim, esta dissertação, apesar de não ser um trabalho técnico de implementação de qualquer tecnologia de aproveitamento de energia solar, teve o intuito de demonstrar o potencial de radiação solar directa para quatro áreas bastante distintas da morfologia urbana, procurando dar mais um contributo para futuras tomadas de decisão no planeamento sustentável e eficiente do aproveitamento da energia solar inseridas no planeamento urbano ou mesmo no planeamento do território.

Toda esta relativa facilidade com que é possível realizar a modelação solar para qualquer sítio do mundo sem ter a necessidade de possuir dados climáticos, tantas vezes incompletos e dispendiosos, só é possível graças a integração de diversos modelos solares desenvolvidos ao longo das últimas e integrados nos sistemas de informação geográfica.

Estes modelos fornecem estimativas da radiação solar incidente, que permitem modelar extensas áreas de território num curto espaço de tempo e com um relativo baixo custo, apresentando resultados com elevada precisão. Com o crescente uso e mediatização estes modelos foram evoluindo e já não se encontram exclusivamente em *softwares* ditos comerciais, mas têm chegado aos *softwares* livres ou usualmente conhecidos por *Open Source* (código aberto). Também estes já não se encontram circunscritos a *software* físico instalado em um qualquer computador ou numa plataforma Web mas em aplicações *mobile* onde com um simples *click* é possível aceder aos dados quase de forma instantânea. Apesar de, no decorrer desta dissertação, as potencialidades destas novas soluções se tenham demonstrado bastante competitivas ainda são pouco amigáveis na sua utilização e com pouco suporte de apoio.

Toda a investigação realizada permitiu identificar as vantagens e desvantagens dos modelos mais utilizados. Quando confrontados com um a ideia de um “Super modelo”, na realidade não existem modelos “bons” nem modelos “maus”, estes apenas representam uma resposta interactiva à realidade que procuram simplificar. Com tantos modelos

disponíveis, cabe a cada um de nós adoptar aquele, ou aqueles, que melhor resposta irá(ão) dar ao nosso problema.

Assim, dados os objectivos propostos foi utilizado o *software* comercial ArcGIS 10.2 e o modelo do *Solar Analyst*, agora na extensão *Solar Radiation*, para o qual foram encontrados um conjunto de parâmetros ideais, uma vez que após a revisão bibliográfica a explicação da utilização dos parâmetros e a forma como a sua variação irão influenciar o resultado final eram pouco esclarecedores. Sendo o principal objectivo, a geração de um modelo com a maior precisão possível, para além de uma calibração minuciosa foi também utilizada a semelhança já de outros trabalhos a tecnologia LIDAR, tecnologia que permite uma precisão na ordem dos centímetros, na criação do Modelo Digital de Superfície que serviu de base a modelação.

Após todos estes componentes devidamente integrados o potencial solar das quatro áreas em estudo para o dia 21 de Dezembro resultou num total de de **608,65** Wh/m² para o Bairro Madre Deus, seguindo-se a área da **Alta de Lisboa** que apresentou o valor de **616,24** Wh/m², a área da **Baixa** obteve **610,37** Wh/m² e, por fim, o **Parque das Nações** foi a área que apresentou valores mais baixos de radiação solar directa com **603,31** Wh/m². Estas diferenças de valores não se devem tanto aos factores gerais como a latitude ou a proporção de radiação, que consegue atravessar a atmosfera, mas sim ao contexto urbano em que ocorre a modelação, *i.e.*, os factores que têm mais peso são sobretudo o ângulo de obstrução condicionado pelo próprio de traçado das ruas (orientação), na altura dos edifícios e na desproporção que existe entre estes e altura dos edifícios.

Ao fazer a comparação das áreas obstruídas, a Alta de Lisboa apresenta a maior percentagem de céu não obstruído com 70% contrastando com os 6% sem obstrução registados na Baixa de Lisboa sendo que a Madre Deus e o Parque das Nações apresentam valores intermédios de aproximadamente 45%. Então como se explica que a Baixa de Lisboa com uma maior área obstruída apresente valores de radiação mais elevados que a Madre Deus? A resposta está na maior quantidade de áreas que se encontram expostas a sul e por isso recebem maior quantidade de energia durante todo o ano (no caso das áreas do hemisfério Norte). A quantidade superior de áreas expostas no quadrante sul e a orientação das ruas ortogonal no caso da Baixa (Ruas de direcção Norte- Sul e de Este-Oeste) ajudam na explicação destes valores de Variação.

No entanto ao fazer a classificação das áreas de maior sombreamento (90% da área disponível) e sem sombreamento (0%) a ordem estabelecida pelos valores de radiação total é alterada ligeiramente sendo que a Alta de Lisboa é a área que apresenta maior área sem sombreamento com 89% seguindo-se o Parque das Nações com 73% a Madre Deus com 53% e a Baixa de Lisboa com 50%. Se apenas se tiver em conta a maior área sem sombreamento, a Alta de Lisboa emerge como o espaço com maior potencial para a instalação de uma tecnologia de aproveitamento energético.

Assim, um dos aspectos mais importantes para o desenvolvimento, impulsionamento e difusão das energias renováveis e em particular a energia solar, prende-se com o potencial associado. A integração dos SIG nos modelos solares, veio sem dúvida permitir a difusão de resultados num curto espaço de tempo e quase sem custos permitindo assim atingir mais público e conseguir maior sensibilização para este tipo de recurso.

A energia solar não é a panaceia para o problema da energia mundial, mas têm sem dúvida um papel importante a desempenhar.

Referências Bibliográficas

- Ahrens, C. D. (2009). *Meteorology Today. An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. 9th Edition. Brooks/Cole USA. ISBN-10: 0-495-55573-8
- Atlas do Ambiente. (1988). *Radiação Solar - Notícia Explicativa*. Lisboa: Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais.
- Austin, J.M., Gallant, J.C., & Van Niel, T. (2013). Mean monthly radiation surfaces for Australia at 1 arc-second resolution. 20th International Congress on Modelling and Simulation, Adelaide, Australia, 1–6 December 2013
- Brito, M. C., Redweik, P. & Catita, C. (2013). Photovoltaics and zero energy buildings: the role of buildings facades. 28th EUPVSEC Paris.
- Brito, M.C., Gomes, N., Santos, T. & Tenedório, J.A. (2011). Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data. *Solar Energy* 86 (2012) 283–288. doi:10.1016/j.solener.2011.09.031
- Collares Pereira, M. (1998). *As Energias Renováveis, a Opção Inadiável*. SPES, Lisboa. Pp 85–110.
- Cosme, A. (2002). *Projecto em Sistemas de Informação Geográfica*. Lisboa: Lidel. ISBN 978-972-757-849-8.
- Demain, C., Journée, M. & Bertrand, C. (2013). Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces, *Renewable Energy*, Volume 50, February 2013, Pages 710-721. doi:10.1016/j.renene.2012.07.031
- Dozier, J. (1980). A clear-sky spectral solar radiation model for snow-covered mountainous terrain. *Water Resources Research*, 16, 709-718.
- Dozier, J., Bruno, J. & Downey, P. (1981). A faster solution to the horizon problem. *Computers and Geosciences*, 7, 145-151.
- Dubayah, R. & Rich, P.M. (1995). Topographic solar radiation models for GIS. *INT.J.GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS*, 1995, VOL.9, NO.4 405-419.
- Dubayah, R. & Rich, P.M. (1996). GIS-based solar radiation modeling. pp 129-134. In: MJ. Goodchild, L.T. Steyaert, B.O. Parks. C. Johnston, D. Maidment, M. Crane, and S. Glendinning (eds). *GIS and environmental modeling: progress and research issues*. GIS World Books. Fort Collins, Co.

- Dubayah, R. (1992). Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data. *Water Resources Research*, 28, 2469-2484.
- Fleming, P.M. (1987). Notes on a radiation index for use in studies of aspect effects on radiation climates. CSIRO Institute of Biological Resources, Division of Water Resources Research. iTech. Memo 87/, Nov. 1987
- Fonseca, A. M. (1999). *Análise Quantitativa de Imagens: Utilização de Imagens Numéricas Multiespectrais no Controlo do Desenvolvimento Urbano*. Dissertação de Doutoramento. Edição I&D, Teses - Barragens, Lisboa, LNEC.
- Frew, J. (1990). *The Image Processing Workbench*. PhD diss., University of California, Santa Barbara.
- Fu, P. & Rich, P. M. (2000 a). *The Solar Analyst 1.0 User Manual*. Helios Environmental Modeling Institute.
- Fu, P. & Rich, P.M. (1999). Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. *Proceedings of the Nineteenth Annual ESRI User Conference*.
- Fu, P. & Rich, P.M. (2000 b). A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry. *Proceedings of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry*. I-357-364.
- Gallant, J.C. (1997). *Modelling Solar Radiation in the Forests of Southeastern Australia*. In McDonald, D.A. and M. McAleer (eds) *MODSIM 1997 International Congress on Modelling and Simulation*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, December 1997, pp. 456-463. ISBN 0 86422 826 0.
- Gastli, A. & Charabi, Y. (2010). Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 14, Issue 2, February 2010, Pages 790-797. doi:10.1016/j.rser.2009.08.018
- Gomes, N. (2011). *Integração de Dados LIDAR com imagens de muito alta resolução espacial para determinação de áreas urbanas com potencial solar*, dissertação de mestrado em Gestão do Território, área de especialização em Detecção Remota e SIG, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa.
- GREENPRO. (2004). *Energia fotovoltaica, manual sobre tecnologias, projectos e instalação*. IST - Instituto Superior Técnico. pp. 1.1-2.19.

- Hayward, T. (2009). Consumption by fuel, 1965 – 2008 . Statistical Review of World Energy 2009.1-48.
- Hetrick, W., Rich, P., Barnes, F. & Weiss, S. (1993). GIS-based solar radiation flux models. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers. Vol 3, GIS. Photogrammetry, and Modeling. 132-143.
- Higuera, E. (2006). Urbanismo Bioclimático. Editorial Gustavo Gili, SL, Barcelona, Espanha.
- Hofierka, J. & Sári, M. (2002). The solar radiation model for Open source GIS: Implementation and applications. Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference 2002, Trento, Italy.
- Hofierka, J. & Cebecauer, T. (2008). Spatially distributed assessment of solar resources for energy applications in Slovakia. Acta Facultatis Studiorum Humanitatis et Naturae Universitatis Prešovensis. Prírodné vedy, Folia Geographica 12, pp. 97-114.
- Hofierka, J. & Kanuk, J. (2009). Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools, Renewable Energy, Volume 34, Issue 10, October 2009, Pages 2206-2214, ISSN 0960-1481, doi:10.1016/j.renene.2009.02.021.
- Hofierka, J. (1997). Direct solar radiation modelling within an open GIS environment. Proceedings of the Joint European GI Conference 1997, Vienna: 575- 584.
- Jähne, B. (1997). Digital Image Processing – Concepts, Algorithms and Scientific Applications, 4th Edition, Berlin, Springer.
- Kang, S., Kim, S. & Lee, D. (2002). Spatial and temporal patterns of solar radiation based on topography and air temperature. Canadian Journal of Forest Research, 2002, Vol. 32, No. 3: pp. 487-497. doi: 10.1139/x01-221.
- Kumar L., Skidmore, A. K., & Knowles, E. (1997). Modelling topographic variation in solarradiation in a GIS environment, Int. J. Geographical Information Science 11, 475-497
- Li, Z., Zhu, Q. & Gold, C. (2005). Digital terrain modeling: principles and methodology. CRC Press. Boca Raton.
- Mardaljevic, J. & Rylatt, M. (2003). Irradiation mapping of complex urban environments: an image-based approach, Energy and Buildings, Volume 35, Issue 1, January 2003, Pages 27-35. doi: 10.1016/S0378-7788(02)00077-4
- Matos, J. L. (2008). Fundamentos de informação geográfica . Lidel, 5ª edição. Lisboa.

- Mészáros, I., Miklánek, P. & Parajka, J. (2002). Solar energy income modelling in mountainous areas . In Erb and Northern European Friend Project 5 Conference, Slovakia. pp. 127–135.
- Miklánek, P. & Mészáros, I. (1993). Modelling of Insolation Characteristics in Mountainous Environment. In: Advances in water sciences, Vol.II: Hydrological processes and transport phenomena in environment. UH SAV, Stara Lesna, Slovakia, 32 - 36.
- Monteith, J.L. & Unsworth, M.H. (1990). Principles of environmental physics. 2 ed. London: Edward Arnold.
- Moore, I., Norton, T. W., & William, J.E. (1993). Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes. *J. Hydrol*, 150, 717-747.
- Néry, F. & Matos, J. (2005). Terrain Parameters in Solar Radiation Models. An evaluation of algorithms used for the extraction of morphological parameters from digital elevation models and their impact in solar radiation modelling at different scales. in Proceedings of the 14th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography. 23pp
- Peixoto, J. P. (1981). A Radiação Solar e o Ambiente. Colecção O Ambiente e o Homem. Secretaria de Estado do Ambiente, Lisboa.
- Piedallu, C. & Gégout, J. C. (2007). Multiscale computation of solar radiation for pre-dictive vegetation modelling. *Annals of Forest Science*, Springer Verlag (Germany), 2007, 64, pp.899-909. Doi; 10.1051/forest:2007072.
- Piedallu, C. & Gégout, J. C. (2008). Efficient assessment of topographic solar radiation to improve plant distribution models. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier Masson, 2008, 148, pp.1696-1706. Doi:10.1016/j.agrformet.2008.06.001
- PNAER (2009). Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis (PNAER): ao abrigo da Directiva 2009/28/CE, de 23 de Abril.
- POLIS (2010). Planeamento Urbano Solar - Manual de boas práticas?? http://www.lisboaenova.org/images/stories/POLIS/ManualBoaspraticas/eNovaPT_Web.pdf
- Pons, X. & Ninyerola, M. (2008). Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*. 28: 1821–1834. Doi:10.1002/joc.1676

- Ramos, C. & Ventura, J.E. (1998). A Energia Solar em Portugal: Potencialidades e Diferenciação Regional. III Congresso da Geografia Portuguesa, Inforgeo, 12-13, Associação Portuguesa de Geógrafos, p.453-461. ISSN: 0872-6825. http://www.apgeo.pt/files/section44/1258367711_INFORGEO_12_13_P453a461.pdf
- RCM nº29 (2010). Resolução do Conselho de Ministros nº29 de 15 de Abril de 2010. “D.R. I Série”. 73 (1289-1296).
- Redweik, P., Catita, C., & Brito, M.C. (2011). International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-4/W19, 2011 ISPRS Hannover 2011 Workshop, 14-17 June 2011, Hannover, Germany.
- Reis, E. (1996). Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica na análise morfológica de bacias hidrográficas, dissertação de mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Reuter, H.I., Kersebaum, K.C., & Wendroth, O. (2005). Modelling of solar radiation influenced by topographic shading – evaluation and application for precision farming. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, pp. 143–149.
- Ribeiro, O. (1994). Opúsculos Geográficos, vol. V, Temas Urbanos, Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian.
- Rich, .P, Hetrick, W., & Saving, S. (1995). Modeling Topographic Influences on Solar Radiation: A Manual for the SOLARFLUX Model. Los Alamos National Laboratory, New Mexico.
- Rocha, A. (2014). Análise da Complexidade de Algoritmos, Lisboa, FCA.
- Roriz, L., Rosendo, J., Lourenço, F. & Calhau, K. (2010). Energia solar em edifícios. Edições Orion. 1-37.
- Ruiz-Arias, A., Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., & Alsamamra, H. (2009). A comparative analysis of DEM-based models to estimate the solar radiation in mountainous terrain. *International Journal of Geographical Information Science* Vol. 23, No. 8, August 2009, 1049–1076 Taylor & Francis.
- Salgueiro, T. (2001). Lisboa. Periferia e Centralidades. Oeiras, Celta
- Santos, T., Gomes, N., Brito, M., Freire, S., Fonseca, A., & Tenedório, J. A. (2011). Solar Potential Analysis in Lisbon Using LiDAR Data. Em *31st EARSeL Symposium 2011 and 34th General Assembly*.

- Santos, T., Gomes, N., Freire, S., Brito, M.C., Santos, L. & Tenedório, J.A. (2014). Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography* 51, 48-57.
- Scharmer, K. & Greif, J. (2000). The European Solar Radiation Atlas, Volume 1: Database and Exploitation Software. Les Presses de l'École des Mines
- Sen, Z. (2008). *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. Springer London. doi: 10.1007/978-1-84800-134-3
- Solangi, K.H., Islam, M.R., Saidur, R., Rahim, N. A & Fayaz, H. (2011). A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2149-2163.
- Súri, M., Huld, T. A. & Dunlop, E. D. (2005). PV-GIS: a web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe . In *International Journal Of Sustainable Energy*. vol. 24, n.º 2. pp. 55–67.
- Szymanowski, M., Kryza, M., Migala, K., Sobolewski, P. & Kolondra, L. (2008). Modelling and validation of the potential solar radiation for the Hornsund Region application of the R.sun model. Polish Association for Spatial Information, *Annals of Geomatics* 2008, Volume VI, Number 2.
- Tovar-Pescador, J., Pozo-Vázquez, D., Ruiz-Arias, J. A., Batlles, J., López, G. & Bosch, J. L. (2006). On the use of the digital elevation model to estimate the solar radiation in areas of complex topography. *Met. Apps.* 13: 279–287. doi: 10.1017/S1350482706002258
- Vallêra, A. (2006). Energia solar fotovoltaica. *Gazeta de Física*. Vol.29. Fasciculo 1-2. 36-41. <http://gazedefisica.spf.pt/magazine/76/pdf>
- Van Dam, O. (2000). Modelling Solar Radiation, Evapotranspiration and Soil Water Dynamics In Tropical Rainforest Logging Gaps In Guyana. doi:10.2495/ENV000271
- Wehr, A. & Lohr, U. (1999). Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 54, p. 68-82.
- Wilson, J.P. & Gallant, J. C. (1997). SRAD: A program for estimating radiation and temperature in complex terrain. *Trans GIS*.
- Wilson, J.P. and Gallant, J.C. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications* (New York: John Wiley and Sons).